



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**Estudio de los diferentes ensayos
de abrasión sobre mezclas
bituminosas destinadas a capas de
rodadura**

Treball realitzat per:

Maria Román Hernández

Dirigit per:

Rodrigo Miró Recasens

Grau en:

Enginyeria Civil

Barcelona, 18 Juny 2014

Departament d'Infraestructura Transport i Territori

TREBALL FINAL DE GRAU

RESUMEN

Uno de los deterioros principales que más pérdidas produce en las capas de rodadura de las carreteras es la abrasión o ravelling. La pérdida de material provocada por el paso de los neumáticos tiene consecuencias tanto en la disminución de las condiciones de confort y seguridad como en la pérdida económica que supone el mantenimiento y la rehabilitación de estos daños.

En este estudio se ha tratado con especial atención el caso de las mezclas discontinuas y templadas ya que debido a los beneficios que comportan respecto a las mezclas convencionales, están siendo desarrolladas e implementadas en las carreteras españolas con mayor frecuencia. Sin embargo, a pesar de las ventajas que este tipo de mezclas ofrecen, el fenómeno de ravelling es crítico en este tipo de mezclas debido a su composición, es por estos motivos que existen aún algunas dudas en su implantación ya que el rendimiento a largo plazo es desconocido debido a la escasa existencia de ensayos que determinen o magnifiquen la durabilidad de este tipo de pavimentos por el efecto del ravelling.

Es por este motivo que el objetivo principal de este trabajo ha sido el de analizar y estudiar los ensayos existentes que evalúan el ravelling, para así poder proponer uno nuevo ya que la normativa Española no contiene ninguna normalización de ensayo específico que evalúe y cuantifique este fenómeno.

A través de la información obtenida y las consideraciones establecidas se ha desarrollado un ensayo de abrasión a partir del método de *abrasión de lechadas por vía húmeda* introduciendo una serie de innovaciones para conseguir una mejor simulación del ravelling. Los resultados del ensayo han sido positivos, a pesar de que algunas consideraciones deban ser establecidas para su correcta interpretación y aplicación.

Palabras clave: Ravelling, Abrasión, Cohesión, Ensayos de abrasión, Mezclas templadas, Mezclas discontinuas, Ensayo Cántabro, Aachener Ravelling Tester.

ABSTRACT

One of the major damage that more losses produces in the wearing course of roads is abrasion or ravelling. The loss of aggregate particles caused by the traffic actions has consequences in reducing comfort and safety conditions and therefore the economic loss that the maintenance and rehabilitation of these failures produces.

This study has analyzed with special attention the case of discontinuous and warm mixes asphalt layers, since due to the benefits they have compared to conventional mixtures, are being developed and implemented on Spanish roads nowadays. However, despite the advantages this type of mixed show, raveling is critical on this type of mixtures due to its composition, so there are still some doubts in its implementation because the long-term behaviour is unknown due to the limited existence of tests that determine or magnify the durability of this type of pavements due to ravelling.

For this reason the main objective of this work is to analyze and study the existing trials that evaluate ravelling, in order to adapt a new laboratory test since the Spanish standards contains no specific standardized test to evaluate and quantify this phenomenon .

Through the information obtained and the considerations established, a new abrasión test method has been developed from the old standard «Wet track abrasion of slurry seals» by introducing some changes in order to simulate better ravelling. The test results have been positive, although some considerations must be established for proper interpretation and futur application.

Keywords: Ravelling, Abrasion, Cohesion, Abrasion test, Warm mix asphalt layers, Porous mix asphalt layers, Cantabro Test, Aachener ravelling tester.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Husos granulométricos de mezclas discontinu.....	-10-
Tabla 2. Características de las mezclas ensayadas con tamaño máximo de 12,5mm.....	-22-
Tabla 3. Influencia de la temperatura en el ensayo Cántabro.....	-23-
Tabla 4. Ensayo Cántabro por via seca, mezcla con filler cal.....	-27-
Tabla 5. Ensayo Cántabro por via húmeda, mezcla con filler cal.....	-27-
Tabla 6. Ensayo Cántabro por via húmeda, mezcla con filler carbonato cisne.....	-27-
Tabla 7. Ensayo Cántabro por via húmeda, mezcla con filler carbonato calcinor.....	-27-
Tabla 8. Ensayo Cántabro por via húmeda, mezcla con filler cal.....	-28-
Tabla 9. Ensayo Cántabro por via húmeda, mezcla con filler de recuperación.....	-28-
Tabla 10. Ensayo Cántabro por via húmeda, mezcla con filler carbonato cemento.....	-28-
Tabla 11. Dosificación mezcla RAP 9% emulsión.....	-34-
Tabla 12. Dosificación mezcla RAP 7% emulsión.....	-34-
Tabla 13. Resultado WTAT mezcla RAP 9% emulsión.....	-34-
Tabla 14. Resultado WTAT mezcla RAP 7% emulsión.....	-34-
Tabla 15. Composición de la mezcla ensayada por Heijmans-breijn.....	-37-
Tabla 17. Resultados del RSAT en %.....	-38-
Tabla 18. Resultados de RSAT para probetas de A50 a 20°C.....	-39-
Tabla 19. Resultados de RSAT para probetas de A73 a 20°C.....	-39-
Tabla 18. Resultados del ensayo ARTe.....	-43-
Tabla 19. Resultados del Tire Sweep Test.....	-48-
Tabla 20. Tabla comparativa de los diferentes ensayos de abrasión.....	-63-
Tabla 21. Resultados ACR 70 temp. Em. 50/70.....	-66-

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplos de ravelling en carreteras.....	-1-
Figura 2. Curvas granulométricas.....	-8-
Figura 3. Curva granulométrica BBTM	-10-
Figura 4. Esquema de mezcla porosa (izquierda) y discontinua (derecha).....	-11-
Figura 5. Modos de fallo en mezclas porosas.....	-12-
Figura 6. Causas de la disgregación en mezclas discontinuas.....	-13-
Figura 7. Tipo de mezclas temperatura de fabricación y consumo energético.....	-15-
Figura 8. Máquina de Los Angeles.....	-21-
Figura 9. Variación de la pérdida por desgaste con la temperatura.....	-23-
Figura 10. Esquema detallado del cabezal de abrasión (NLT-320/87).....	-31-
Figura 11. Máquina de abrasión de lechadas.....	-32-
Figura 12. Curva típica obtenida en el ensayo WTAT.....	-32-
Figura 12. Curva típica obtenida en el ensayo WTAT.....	-33-
Figura 15. Máquina de abrasión RSAT.....	-36-
Figura 16. Probeta con pérdida de árido después del ensayo RSAT.....	-37-
Figura 17. Pérdida de material RSAT en el tiempo.....	-38-
Figura 18. Descripción del funcionamiento de la máquina de abrasión ARTe.....	-42-
Figura 19. Máquina ensayo ARTe.....	-42-
Figura 20. Número de repeticiones del Tire Sweep Test (a) y ejemplo de área abrasada por el mismo ensayo (b).....	-46-
Figura 21. Gráfico de salida del Tire Sweep Test ($K= 3346576,11 \text{ g/(J/Pa)}$).....	-47-
Figura 22. Base adaptada del Ravelling Test.....	-50-
Figura 23. Máquina de abrasión del Ravelling Test.....	-51-

Figura 24. Pérdida por desgaste de una mezcla con emulsión sin material reciclado (izquierda) y una reciclada (derecha) en el ensayo de Ravelling Test.....	52-
Figura 25. Máquina Prall.....	54-
Figura 26. Esquema detallado de la máquina de abrasión “método A”.....	54-
Figura 27. Esquema detallado de la máquina de abrasión “método B”	56-
Figura 27. Pérdida de material en 8 muestras.....	57-
Figura 28. Placa base y muestra del ensayo propuesto.....	65-
Figura 29. Cepillo de alambres trenzados de acero.....	65-

ÍNDICE

Capítulo 1 Introducción.....	-1-
1.1 Introducción.....	-1-
1.2 Objetivos del estudio.	-5-
1.3 Metodología del trabajo.....	-5-
Capítulo 2 Mezclas bituminosas para capas de rodadura.....	-7-
2.1 Mezclas bituminosas.....	-7-
2.2 Mezclas bituminosas discontinuas.....	-9-
2.3 Mezclas bituminosas templadas.....	-14-
2.4 Efecto del agua en las mezclas.....	-17-
Capítulo 3 Ensayos de abrasión.....	-19-
3.1 Introducción.....	-19-
3.2 Ensayo Cántabro de pérdida por desgaste.....	-20-
3.3 Efecto Cántabro de pérdida por desgaste por vía húmeda.....	-25-
3.4 Ensayo de abrasión de lechadas bituminosas.....	-30-
3.5 Rotating surface abrasión test (RSAT).....	-36-
3.6 ARTe Test	-41-
3.7 Tire Sweep Test	-45-
3.8 Ravelling Test	-50-
3.9 Ensayo de abrasion por neumáticos claveteados.....	-53-
Capítulo 4 Análisis de los ensayos.....	-59-
4.1 Introducción.....	-59-
4.2 Análisis.....	-59-
Capítulo 5 Propuesta de ensayo.....	-64-
5.1 Introducción y objetivos.....	-64-
5.2 Descripción del ensayo.....	-64-
5.3 Resultados.....	-66-
5.4 Conclusiones relativas al ensayo.....	-67-
Capítulo 6 Conclusiones.....	-68-
Capítulo 7 Bibliografía.....	-70-

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La abrasión o *ravelling* en mezclas bituminosas destinadas a capas de rodadura es uno de los factores más influyentes en el deterioro de los pavimentos en carreteras, ya que produce una reducción considerable de su vida útil. La pérdida de material provocada por el paso de los neumáticos tiene consecuencias tanto en la disminución de las condiciones de confort y seguridad como en la pérdida económica que supone el mantenimiento y la rehabilitación de estos daños.

De acuerdo con la definición dada por el Instituto de Asfalto, el *ravelling* se puede definir como “la pérdida progresiva de materia de la superficie debida a la erosión y/o abrasión del tráfico”.

Esta resistencia inadecuada a la abrasión de los áridos se traduce en una pérdida de la textura requerida para mantener la resistencia de la carretera al deslizamiento a altas velocidades, es decir una reducción más que significativa en el factor seguridad. Algunos ejemplos del efecto del *ravelling* excesivo se muestran en la *figura 1*.





Figura 1. Ejemplos de ravelling en carreteras (Salil Mohan, 2010).

El ravelling en la capas de rodadura, por lo general, comienza a aparecer lentamente pero al cabo de 7-9 años de la puesta en obra de la carretera se desarrolla con más rapidez debido a un efecto dominó. A medida que una partícula es separada de la mezcla por el paso del tráfico las demás partículas adyacentes pierden cohesión ya que quedan sin apoyo en algún punto de su superficie. Si el ligante no proporciona suficiente adherencia para estas partículas del entorno, es decir si no están completamente envueltas de ligante hidrocarbonado, ellas también se separarán y consigo el material adyacente produciendo una pérdida en cadena del árido de la mezcla, proceso que se acelerará dando lugar a socavones en el pavimento.

Según diferentes autores algunas de las causas principales de la aparición del ravelling a corto plazo, o prematuro, se debe a una intensa fuerza cortante que se da en el contacto entre neumáticos y pavimento [8], y a la cantidad de roca débil existente en la mezcla que junto a condiciones meteorológicas adversas provoca un incremento en la superficie abrasionada por el tráfico [9]. En contrapartida se determinó que la abrasión a largo plazo era, sin embargo, causada por el envejecimiento del ligante debido, de nuevo, por acciones meteorológicas [10] El ligante puede llegar a desarrollar dos tipos de envejecimiento, físico y químico. El primero de ellos resulta de un aumento de la viscosidad sin llegar a experimentar cambios químicos. Se produce cuando el material se almacena a temperaturas frías y da lugar a cambios moleculares lentos, haciendo el material más rígido y menos capaz de relajarse. Este tipo de envejecimiento es reversible después del paso del ligante a fase líquida con sólo calentarlo. El envejecimiento químico, en contrapartida, es el proceso más grande y complejo y corresponde a reacciones de oxidación. Como en el primer caso, también conduce al endurecimiento del betún bajo el efecto combinado de calor y el oxígeno. Pero contrariamente al envejecimiento físico, éste es un mecanismo irreversible en el cual la cinética de endurecimiento está influenciada por la temperatura, los rayos ultravioleta (UV), la humedad y las características del material.

En resumen, podemos definir las causas principales del ravelling como:

- Falta de adhesividad entre el ligante y las partículas, que provoca una reducción en la cohesión a escala micro y de la resistencia a escala macro. Normalmente se produce cuando algunas partículas del árido están recubiertas por una capa de polvo, ya que el ligante no es capaz de adherirse a la partícula y la deja libre en alguno de los puntos de su superficie.
- Segregación del agregado. Si las partículas finas no se encuentran en la matriz del conjunto, entonces el ligante solo es capaz de unirse a las partículas gruesas restantes en sus relativamente pocos puntos de contacto.
- Compactación pobre durante su puesta en obra.
- Desprendimiento debido a ciertos tipos de tráfico (neumáticos con clavos, cuchillas quitanieves o vehículos orugas)
- Mala dosificación del ligante.
- Condiciones climáticas adversas.

En este estudio trataremos especialmente el caso de mezclas discontinuas, en las que debido a su composición granulométrica, en la que faltan los tamaños de árido intermedios, las partículas gruesas pueden desprenderse con más facilidad. Si además se trata de mezclas templadas, donde la emulsión utilizada para su fabricación puede proporcionar una cohesión inferior a la obtenida con los betunes asfálticos el problema de abrasión puede verse agravado.

Las mezclas templadas son una tecnología relativamente nueva que fue introducida en 1995 en Europa. Este tipo de mezclas presentan una problemática debido a que el ligante utilizado es una emulsión cuya capacidad de cohesión es menor que la de los betunes asfálticos convencionales utilizados en mezclas en caliente.

En contrapartida, este tipo de mezclas tienen la ventaja de reducir la temperatura de puesta en obra, que será de entre 100°C y 140°C, y esto conlleva a una reducción del consumo de energía, disminución de las emisiones y humos, ampliación del período de construcción que ya no solo se dará en estaciones con temperaturas más elevadas y un aumento en la seguridad laboral.

Pero a pesar de las ventajas anteriormente mencionadas, existen aún algunas dudas en la implantación de estas mezclas ya que el rendimiento a largo plazo es desconocido debido a la escasa existencia de ensayos que determinen o magnifiquen la durabilidad de este tipo de pavimentos.

Actualmente existen muchos ensayos que evalúan la resistencia de las superficies de rodadura a las acciones del tráfico. Muchos de ellos miden las deformaciones, roderas causadas por el paso de vehículos, resistencia a fuerzas tangenciales y más. Sin embargo en

las normativas vigentes que existen en diferentes países, son pocos los ensayos que estudian, analizan y cuantifican el ravelling que el peso del tráfico produce en el pavimento. Además no todos ellos han sido diseñados concretamente para evaluar este fenómeno, sino que muchos han sido desarrollados a partir de otros ensayos como por ejemplo el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste, en el que se utiliza la máquina de Los Angeles para determinar la disgregación de las partículas mediante un número de revoluciones del tambor, quitando las bolas metálicas para así poder adaptarlo a este nuevo procedimiento. Además algunos de estos ensayos han sido implementados pocos años atrás, por lo que no se sabe con certeza el grado de precisión del que disponen y suelen necesitar el apoyo de otros ensayos para verificar los resultados, por este motivo y por la complejidad que muchas veces supone poner en funcionamiento dichos ensayos se convierten en pruebas, a veces, muy costosas.

Si nos fijamos en la normativa española, se recogen algunos ensayos que pueden aproximar o simular el efecto de la abrasión, pero ninguno de ellos contempla realmente la acción abrasiva del contacto entre el pavimento y los neumáticos así como la trayectoria de los vehículos al circular. Algunos de estos test son el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste o el ensayo de abrasión por neumáticos claveteados (capítulos 3.2 y 3.9). Este último determina la pérdida de material que provocaría el paso de un vehículo dispuesto de neumáticos de clavos.

Además, debido al aumento de daño que el efecto del agua puede inducir en la disgregación de partículas de árido de la mezcla (capítulo 2.4), es conveniente que estos ensayos puedan determinar y cuantificar este efecto. Un ejemplo es el ensayo Cántabro de pérdida por desgaste por vía húmeda, que a pesar de no reproducir el ravelling causado por el contacto entre neumático y la capa de rodadura, nos da información de cómo y cuánto se agrava el problema comparando muestras sumergidas en agua con otras conservadas al aire.

Es por esto que el objetivo principal de este trabajo es estudiar los ensayos existentes de abrasión sobre mezclas bituminosas destinadas a capas de rodadura desarrollados por diferentes investigadores, con el fin de adaptar o proponer alguno nuevo ya que en España no existe aún un ensayo normalizado que evalúe el daño por abrasión específicamente. Teniendo en cuenta que la aparición de este fenómeno varía mucho entre diferentes países dependiendo en el método constructivo, especificaciones, material disponible y condiciones climáticas de los diferentes lugares.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es estudiar los ensayos existentes de abrasión sobre mezclas bituminosas destinadas a capas de rodadura -especialmente para el caso de mezclas discontinuas templadas- desarrollados por diferentes investigadores, con el fin de adaptar o proponer alguno nuevo.

Definimos los objetivos específicamente como:

- Realización de una revisión bibliográfica sobre los diferentes ensayos de abrasión existentes sobre mezclas bituminosas destinadas a capas de rodadura en el ámbito internacional.
- Analizar y comparar los diferentes ensayos desde el punto de vista de carga y presión de ensayo, valores de resistencia a la abrasión, tiempos de ensayo, maquinaria requerida y tipos de mezcla bituminosa sobre la cual se aplica el ensayo.
- Proponer un ensayo basándose en las experiencias mencionadas y adaptándolo a los recursos de los que actualmente se dispone.

1.3 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Este trabajo está compuesto por seis capítulos que describen el estudio sobre el efecto de la abrasión en capas de rodadura y, los ensayos que existen en diferentes países sobre este daño producido en carreteras.

El capítulo 1 proporciona una breve introducción al problema existente en el daño de carreteras, incluyendo una pequeña descripción de las causas principales del ravelling, y se describen los objetivos principales de este estudio.

Tras este capítulo introductorio, en el capítulo 2 se introducen los conceptos de mezclas discontinuas y templadas, describiendo cuál es su funcionalidad en la implementación de este tipo de mezclas en capas de rodadura y cómo se ven afectados por el ravelling.

En el capítulo 3 se hace una revisión bibliográfica de los diferentes ensayos de abrasión que existen en diferentes países junto a un breve estudio de sus características y experiencias.

En el capítulo 4 se hace una comparativa de los diferentes ensayos estudiados y se determinan las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

El capítulo 5 consta de una breve introducción donde se justifica el objeto del estudio y describe el ensayo propuesto una vez se ha llevado a cabo las conclusiones del estudio de los diferentes ensayos.

Finalmente las conclusiones y algunas observaciones del estudio se dan en el capítulo 6.

CAPÍTULO 2 MEZCLAS BITUMINOSAS PARA CAPAS DE RODADURA

2.1 MEZCLAS BITUMINOSAS

Las mezclas bituminosas están formadas por una combinación de ligante hidrocarbonado, áridos y en algunas ocasiones aditivos, de forma que mezclados a altas temperaturas todas las partículas del árido quedan recubiertas por una película continua y homogénea de ligante.

Los áridos son un conjunto de partículas minerales de diferente granulometría que normalmente proceden de la explotación de canteras. Su función es la de dar resistencia a la mezcla mediante el rozamiento interno de su esqueleto mineral, y se considera un material elastoplástico. Estos áridos pueden ser de tamaño grueso, fino y filler, donde el porcentaje de cada fracción de árido viene determinado por el tipo de mezcla.

Por otro lado, el ligante es un material viscoelástico que tiene la función de dar cohesión a los diferentes elementos del árido para que la mezcla bituminosa tenga la resistencia deseada, envolviendo de forma uniforme todas las partículas de éste. El ligante puede tratarse de betún asfáltico o emulsión dependiendo de la temperatura de mezclado. Podemos definir el betún como aquellos productos sólidos o viscosos naturales u obtenidos a partir de hidrocarburos mediante la destilación, oxidación o cracking, es decir derivados del petróleo. Las emulsiones en cambio son dispersiones coloidales de betún asfáltico puro o algo fluidificado en agua.

Durante su puesta en uso, el ligante debe tener fluidez para que se adhiera al árido, y una vez incorporado al firme, debe resistir con eficacia a las acciones del tráfico y a los agentes atmosféricos. Por una parte debe ser suficientemente consistente y viscoso para que a altas temperaturas y bajo las cargas del tráfico el firme se mantenga sin deformaciones, pero por otro lado debe tener suficiente flexibilidad en condiciones de bajas temperaturas de tal forma que el firme no sea muy frágil y se quiebre.

Con las consideraciones anteriores podemos decir que las mezclas bituminosas son un material viscoelastoplástico cuyo comportamiento depende de la temperatura y velocidad de aplicación de las cargas debido al contenido de ligante. Estas mezclas empleadas en capa de rodadura deben proporcionar una serie de características para mantener el confort y la seguridad de la carretera. Entre ellas:

- Estabilidad

- flexibilidad del firme
- Resistencia a deformaciones y fatiga
- Impermeabilidad
- Resistencia a la disgregación

Esta última propiedad está intrínsecamente relacionada con el ligante bituminoso utilizado en la mezcla y será el objeto de nuestro estudio.

Finalmente, una vez definidos los elementos básicos que componen las mezclas bituminosas podemos clasificarlas según su granulometría como mezclas continuas o discontinuas. Son continuas aquellas que casi todos los tamices retienen materia, por lo que existe una variación escalonada de los tamaños de grano y a la curva adopta una forma suave aproximándose a una recta. Sin embargo las mezclas discontinuas presentan una curva granulométrica con discontinuidades debidas a que alguno de los tamices no retiene material, es decir, falta algún tamaño de árido. En la *figura 2* podemos ver representado con una línea roja la curva granulométrica de cada uno de estos tipos de mezclas.

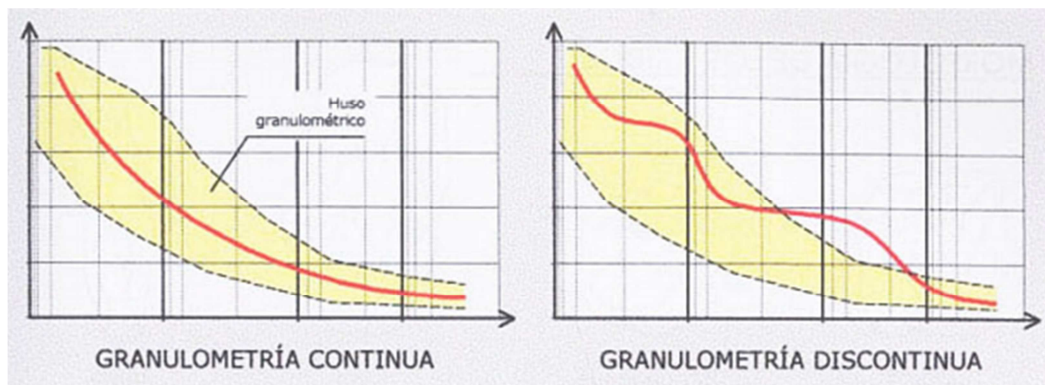


Figura 2. Curvas granulométricas (Bañón Blázquez, 2000).

Además, también podemos clasificar las mezclas bituminosas según la temperatura de puesta en obra. Pueden ser en calientes, mezcla entorno a los 150-180°C, en las que se usan betunes de penetración o frías las cuales están fabricadas con emulsiones bituminosas a temperatura ambiente.

Como habíamos especificado en el capítulo primero (*Introducción*) nos vamos a centrar en las mezclas discontinuas que emplean emulsiones, es decir en frío o templadas, ya que son las que agravan el problema del ravelling y por tanto estudiaremos que factores específicamente hacen que estos daños se produzcan con mayor frecuencia en este tipo de mezclas.

2.2 MEZCLAS DISCONTINUAS

Introducción

Las mezclas bituminosas discontinuas son aquellas que presentan una discontinuidad granulométrica muy acentuada en los tamices inferiores del árido grueso, es decir no contienen los tamaños de árido intermedios. Estas mezclas se fabrican con un alto contenido de ligante hidrocarbonado, aproximadamente del 5-7%, con la finalidad de formar un buen mástico con el filler para así proporcionar una cohesión adecuada a la mezcla e incrementar la resistencia a la abrasión para evitar daños prematuros en la carretera.

Este tipo de mezclas se desarrollaron en Alemania buscando un elevado contenido de betún que no tuviesen problemas de deformaciones plásticas y que se pudiesen compactar en capas relativamente finas. Estas mezclas son las denominadas SMA (Stone Mastic Asphalt), se caracterizan por poseer un esqueleto mineral con un elevado contacto directo entre las partículas grandes, un mástico rico en ligante y con una proporción importante de filler, para rellenar los huecos de los áridos y proporcionar una gran cohesión a la mezcla, y aditivo estabilizante para evitar el escurrimiento del ligante y segregación del mortero.

En Francia se modificó este diseño disminuyendo el contenido de betún respecto al modelo anterior para obtener una mayor textura. Estas mezclas son las llamadas BBTM, podemos diferenciar entre dos tipos. Las mezclas tipo BBTM B (antiguas M), son mezclas abiertas con un porcentaje de huecos en mezcla elevado (>12%, generalmente fabricadas con un 16 % de huecos) mientras que las mezclas tipo BBTM A (antigua F), son mezclas más cerradas, con un porcentaje de huecos en mezcla variable entre el 4 y el 8 %.

En España se empezaron a emplear este tipo de mezclas a partir de los años ochenta para la construcción de capas de rodadura delgadas (BBTM A y BBTM B) restringiendo el uso de estas mezclas a espesores de entre 2 y 3 centímetros.

Según el Artículo 543 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) los husos granulométricos deben estar comprendidos entre los siguientes intervalos indicados en la *tabla 1*.

TABLA 543.9 - HUSOS GRANULOMÉTRICOS. CERNIDO ACUMULADO (% en masa)

TIPO DE MEZCLA (**)	ABERTURA DE LOS TAMICES (mm)							
	22	16	11,2	8	5,6	4	2	0,5
BBTM 8B (*)	-	100	90-100	42-62	17-27	15-25	8-16	4-6
BBTM 11B (*)	100	90-100	60-80		17-27	15-25	8-16	4-6
BBTM 8A (*)	-	100	90-100	50-70	28-38	25-35	12-22	7-9
BBTM 11A (*)	100	90-100	62-82		28-38	25-35	12-22	7-9

2 mm de la UNE-EN 933-2, será inferior al ocho por ciento (8%).
 (**) Se ha omitido en la denominación de la mezcla la indicación del tipo de ligante por no ser relevante a efectos de esta tabla.

Tabla 1. Husos granulométricos de mezclas discontinuas (PG3-543).

Obteniéndose una curva granulométrica como la siguiente:

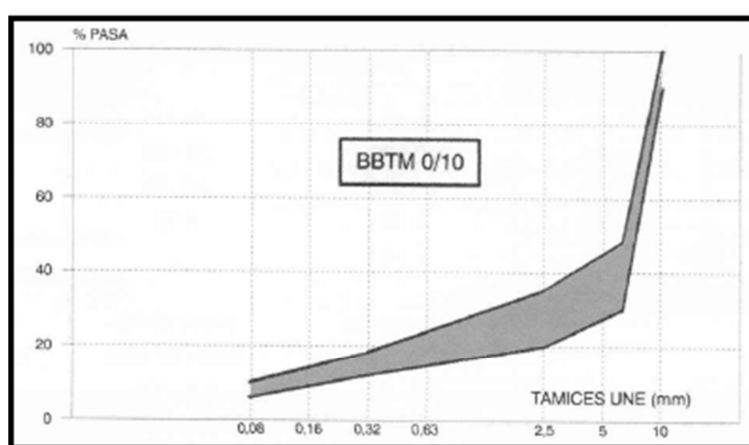


Figura 3. Curva granulométrica BBTM (Carreteras, 1997).

Donde queda reflejada la discontinuidad que existe entre los tamices 2,5mm y 5mm entre los cuales hay una reducción considerable de los áridos, si lo comparásemos con una mezcla de granulometría continua.

Las principales diferencias que presentan estas mezclas respecto a las mezclas bituminosas convencionales son:

- Curva granulométrica de áridos discontinua. Existe una ausencia de material entre los tamaños 2,5 y 5 mm.
- Porcentaje de ligante superior al empleado en las mezclas convencionales (aproximadamente un 15 % mayor).
- Elevada macrotextura del pavimento.

Se trata de mezclas empleadas en capas de rodadura que, a pesar de no resolver problemas estructurales del firme debido a su pequeño espesor, proporcionan características superficiales que mejoran de forma más que notable la seguridad y confort del usuario mediante un coste pequeño. Algunas de estas ventajas son la resistencia al deslizamiento, drenabilidad de la superficie del firme y la reducción de la

sonoridad de la carretera por el paso de vehículos debido a los huecos que existen en la mezcla.

En definitiva, se trata de unas mezclas de granulometría muy similar a la de las mezclas porosas, fabricadas con ligantes modificados con polímeros o fibras cuyo acabado presenta un aspecto idéntico al de una mezcla porosa. Se diferencian en su menor porosidad al haber quedado los huecos rellenos con mástico, podemos ver esta diferencia en la *figura 4*, donde se muestra una mezcla porosa y una discontinua respectivamente.

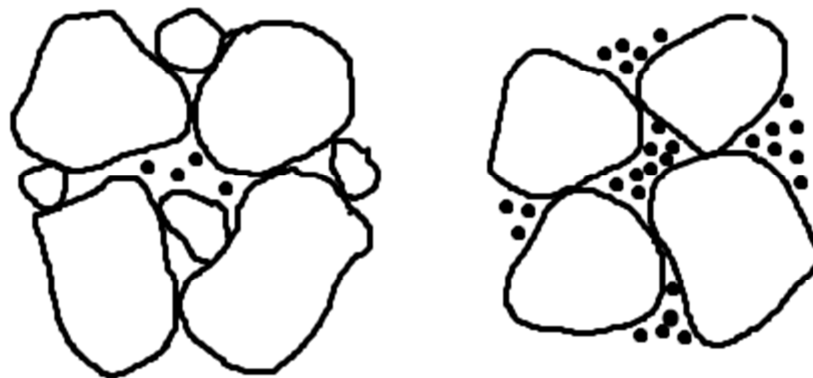


Figura 4. Esquema de mezcla porosa (izquierda) y discontinua (derecha).

Estas ventajas nombradas anteriormente son producidas por los huecos que existen en la mezcla, pero como explicaremos en el siguiente apartado, esta falta de tamaño intermedio de árido también provoca ciertos problemas en el pavimento.

Ravelling en mezclas discontinuas

Las mezclas bituminosas que se utilizaban anteriormente en capas de rodadura eran de granulometría continua de tipo denso con alto contenido de árido fino y fallaban por su falta de macrotextura y composición. Sin embargo, debido a esta densidad granulométrica, la resistencia abrasiva causada por el tráfico estaba asegurada por la buena cohesión de la mezcla.

El factor más importante y decisivo que caracteriza la durabilidad de las mezclas discontinuas es el raveling. Las mezclas con alto contenido de poros están caracterizadas por tener un alto contenido de árido grueso y se considera que el ligante

bituminoso junto a las partículas de áridos están sometidos a las fuerzas de tracción, compresión y cortantes.

Considerando las características anteriormente descritas de las mezclas con alto contenido en poros se considera que el fallo por ravelling se produce por pérdida de adhesión en la interfase entre los áridos y el ligante, figura 5.

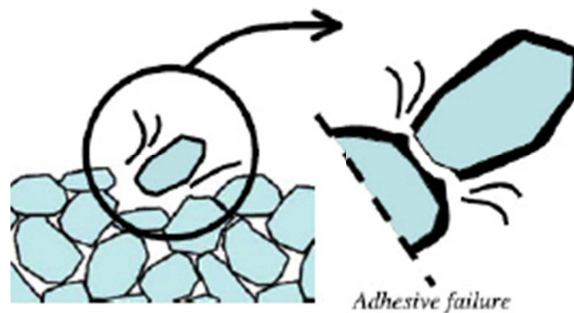


Figura 5. Modos de fallo en mezclas porosas (Kringos, 2007)

La adherencia es un fenómeno bastante complejo en el que intervienen numerosos factores físicos como el tipo de agregado, el espesor de la película de ligante o la suciedad del árido y, factores químicos relacionados con la composición química del árido y del ligante.

El tipo de agregado que se emplea en la mezcla tiene efectos en la adhesividad, es decir, la resistencia a la separación entre el ligante y el árido y, viene determinada por la rugosidad de la piedra. Normalmente una superficie más rugosa produce un enlace más fuerte con el ligante.

En cuanto al grado de suciedad del árido se sabe que, cuanto más limpias y secas estén las partículas más facilidad tendrá el ligante en envolver las piedras del árido. Sin embargo las partículas que tienen cierta humedad, sus superficies presentan cierta polaridad cuyo signo depende de la naturaleza del mismo, ácida o básica. Los áridos ácidos suelen tener una mala adhesividad con el ligante mientras que los básicos actúan al contrario.

El contenido de ligante determina el espesor de la capa que rodea los áridos, si el contenido es bajo la capa de la mezcla será más delgada y será más fácil que sea atacada por los factores climáticos. Además una película de ligante delgada tiene una adhesión con las partículas de árido mucho más baja ya que las piedras no están perfectamente recubiertas de ligante.

Además, la disminución de rozamiento interno entre las partículas de tamaño mayor del árido, debido a los relativamente pocos puntos de contacto entre partículas

comparada con las mezclas densas, hace que la posible pérdida de material al paso de los vehículos sea más elevada.

Sin embargo según el tipo de ligante que estemos empleando podemos solventar o no este problema. Ya que una buena adherencia entre el ligante y el árido puede dificultar la pérdida de material.

Por tanto, la sensibilidad de la capa de rodadura frente al efecto del ravelling vendrá determinada también por el tipo de ligante utilizado, ya que al tener mayor porosidad y accesibilidad del agua puede esperarse una menor resistencia al envejecimiento y posiblemente la pérdida de adherencia entre el ligante y las partículas del árido, debido a los efectos climatológicos.

En conclusión, la existencia de huecos en la mezcla produce que el ligante sea más sensible a los efectos climatológicos, ya que gran parte de éste queda al descubierto y los poros de la mezcla permiten el paso del agua y por consiguiente el posible daño que puede provocar sobre el ligante, como explicaremos en el apartado “*efecto del agua en mezclas*” podemos ver reflejado el efecto combinado de la porosidad y el clima en la *Figura 6*.

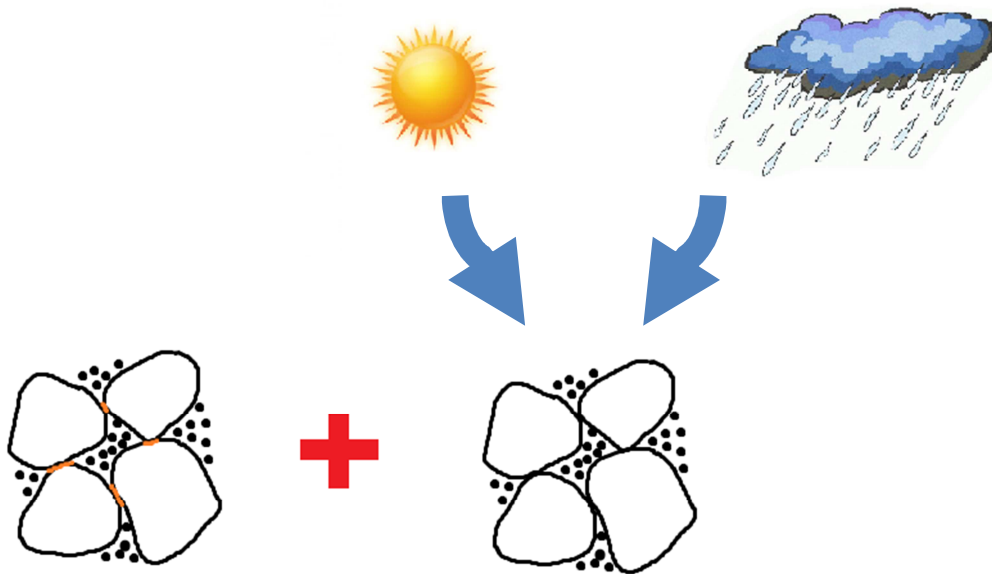


Figura 6. Causas de la disgregación en mezclas discontinuas.

En la carretera N-634, que discurre entre San Sebastián y Santiago de Compostela, tras siete años de puesta en servicio, se hizo un estudio el deterioro que había sufrido el pavimento. Presentaba daños superficiales por abrasión, peladuras, baches y zonas disgregadas de forma similar o incluso menor que en otros tramos en los que la mezcla empleada era densa. Pero no se apreciaron fallos que indicasen la falta de cohesión de la mezcla para resistir de forma eficiente la acción abrasiva provocada por el tráfico.

Esto se debe a que la mezcla empleada era en caliente y el ligante betún, con lo cual la durabilidad de la mezcla se parece a la de una menos porosa ya que debemos tener en cuenta que la película de ligante que envuelve los áridos en este tipo de mezclas es de mayor espesor que en la mezclas convencionales.

De todas maneras, para poder cuantificar y valorar la sensibilidad a la disgregación de las mezclas bituminosas abiertas se desarrolló en el Laboratorio de Caminos y Aeropuertos de la Escuela de Caminos de Santander el «Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste», cuya función era la de cuantificar y medir la resistencia a este tipo de daño. Como explicaremos en el capítulo 3.2 (Ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste), éste consiste en introducir una probeta en la máquina de Los Angeles, sin bolas, y determinar la pérdida de material que se produce tras 300 revoluciones. El desgaste que se produce en la probeta con el paso de las revoluciones esta intrínsecamente ligado a la cohesión de la que dispone la mezcla, cuanto mayor sea la cohesión menor será la pérdida que se produce en el material.

A pesar de que el ensayo dispone de una gran precisión y exactitud, éste mide la disgregación de las partículas tras una serie de revoluciones pero no simula la acción abrasiva de los neumáticos, con lo cual nos puede servir como guía pero no refleja exactamente el problema del ravelling.

2.3 MEZCLAS TEMPLADAS

Durante muchos años la industria de las mezclas asfálticas ha intentado encontrar mejoras tecnológicas para desarrollar nuevos tipos de mezclas que aporten características evolucionadas a las convencionales. Es por eso que una de las vías de investigación que se ha llevado a cabo durante la última década ha sido la de reducir la temperatura de producción de las mezclas bituminosas, ya que es una de las características que más afectan al consumo energético y en las que el daño ambiental es mayor.

Estas mezclas elaboradas a temperaturas más reducidas que las calientes pueden ser clasificadas en función de la temperatura en que se fabrican *figura 7*.

- Mezclas *Semicalientes* (WMA, *Warm Mix Asphalt*) para las mezclas fabricadas por encima de 100°C y con un límite superior de unos 140°C.
- Mezclas *Templadas* (*Half-Warm mixes*) para las mezclas fabricadas por debajo de 100°C y con un límite inferior de unos 60°C.
- Mezclas *en Frío* (*Cold mixes*) para las mezclas fabricadas a temperatura ambiente, sin calentar áridos ni ligante.

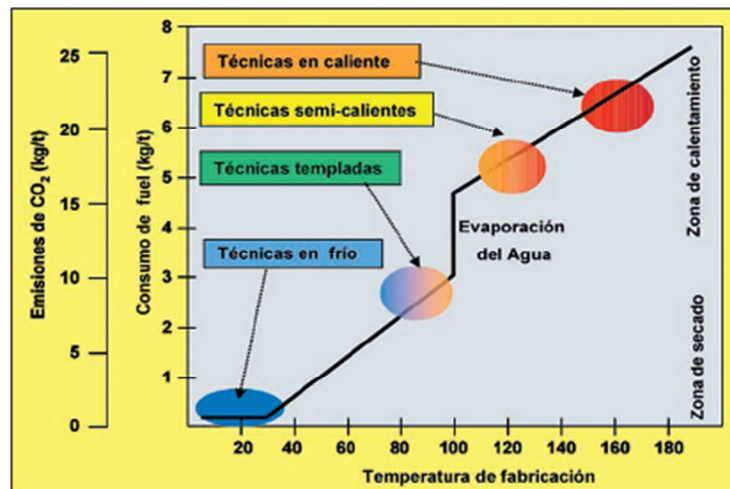


Figura 7. Tipo de mezclas temperatura de fabricación y consumo energético (Bardesi A.)

Los sistemas para conseguir reducir la temperatura de fabricación y puesta en obra para creas las mezclas anteriormente descritas, pueden describirse como:

- Aditivación del betún.
- Espumación del betún.
- Incorporación de materiales específicos en el proceso de mezclado.
- Modificando las técnicas de fabricación de las mezcla.

Las mezclas templadas, también conocidas son una tecnología relativamente nueva introducida en Europa en 1995. Podemos definir una mezcla templada como la combinación de áridos y emulsión realizada a una temperatura de áridos que se acerca a los 60-100°C. El uso de emulsión como ligante permite aumentar la trabajabilidad de la mezcla a temperaturas más bajas disminuyendo la viscosidad de ésta y es la principal singularidad de este tipo de mezclas.

La emulsión es una dispersión coloidal de partículas de betún en agua que permite una mezcla entre el árido y el ligante a temperatura ambiente sin necesidad de calentar previamente ninguno de los componentes de la mezcla. Cuando la mezcla va perdiendo humedad, las partículas de betún vuelven a entrar en contacto proporcionando al material la cohesión necesaria para cumplir su función conglomerante. Este proceso se conoce como maduración de la emulsión, coloquialmente curado, y llamamos rotura de la emulsión el momento en que el agua comienza a evaporarse. Instantes después de la rotura de la emulsión, la mezcla se va densificando debido a la acción del tráfico rodado y la maduración, pero no será hasta que pierda toda la humedad cuando alcance su densidad máxima.

Este tipo de mezclas está ganando cada vez más importancia debido a la serie de ventajas que presenta respecto a las mezclas en caliente, gracias a la baja temperatura en la cual la mezcla se fabrica y extiende. Los beneficios se pueden clasificar según los siguientes criterios:

- Medioambientales: Eficiencia energética (reducción hasta del 30% en el consumo de energía), y disminución de los gases de efecto invernadero.
- Seguridad: Reducción del riesgo de accidente de los trabajadores durante la fabricación y extendido de la mezcla así como a la exposición frente a gases emitidos.
- Económicos: Desarrollo sostenible que junto a la seguridad laboral incrementa la productividad y extensión del período de construcción, que ya no solo se reducirá a épocas más calurosas.

En cuanto a las ventajas que se obtienen en la estructura y características de la mezcla cabe destacar que los mismos mecanismos por los cuales las mezclas templadas mejoran la trabajabilidad a temperaturas inferiores también le permiten actuar como herramienta en la compactación y esto conlleva a una reducción en el envejecimiento del ligante y por tanto a un aumento en la vida útil de la carretera. Además la reducción en la temperatura de compactación amplía el tiempo en que la mezcla puede ser compactada.

Pero a pesar de las ventajas anteriormente mencionadas, existen aún algunas dudas o problemas con vistas a la implantación de estas mezclas a largo plazo, ya que su rendimiento es aún desconocido debido a que los ensayos de campo no tienen más de 10 años de antigüedad por tratarse de una tecnología todavía muy nueva. Además cabe destacar que debido a la menor capacidad de cohesión que tienen las emulsiones respecto a los ligantes bituminosos en caliente encontramos ciertos problemas en la superficie del firme que describiremos en el siguiente apartado.

Ravelling en mezclas templadas

La afinidad entre el ligante y los áridos es una de las propiedades más significativas en cuanto a la tendencia a la disgregación de las partículas de la mezcla, es decir el ravelling. En el caso de tratarse de emulsiones este fenómeno es más complejo si cabe.

Durante la etapa de mezcla, la inestabilidad de la emulsión viene caracterizada principalmente por el tipo de árido, que dificulta o facilita la envoltura en el ligante y la

correspondiente cohesión de la mezcla, sabiendo que cuanto menor sea la cohesión mayor será la pérdida de material en la capa de rodadura.

Los fenómenos que pueden iniciar la rotura entre la emulsión y el árido al entrar en contacto son descritos como [13]:

- La capacidad de absorción de agua que presenta el árido. Cuanto mayor es la capacidad que posee el árido en absorber agua, mayor es la posibilidad de que se produzca la precipitación de las partículas de betún que conlleva a la envoltura de los áridos mediante enlaces débiles fáciles de romper por la acción del tráfico. Este fenómeno, llamado aspiración, se produce con mayor facilidad si los áridos son secos y están a temperaturas elevadas.
- Un cambio repentino en el valor el pH de los áridos. Característico de los áridos calcáreos con pH neutro inicial.
- La presencia de agua que polariza la superficie de los áridos dividiéndolos en ácidos y básicos. La acidez del árido esta intrínsecamente relacionada con su contenido en sílice y determina la afinidad que tendrá el árido con el agua, también llamado hidrofilia. Cuanto mayor sea el contenido en sílice menor será la adhesividad con el ligante. Sin embargo los áridos básicos, como los calizos, presentan una adhesividad natural más elevada.

El agua tiene un papel fundamental en la disminución de la cohesión de los elementos de la mezcla, es por este motivo que se dedica el siguiente subcapítulo al daño que produce este fenómeno en la disgregación de partículas de árido de las mezclas bituminosas.

2.4 EFECTO DEL AGUA EN LAS MEZCLAS

Cuando el agua penetra en la interfase entre el árido y el ligante, se produce una disminución en el contacto entre ambos materiales y este fenómeno puede dar lugar a la disgregación de algunas partículas de árido de la mezcla. El agua rompe los enlaces entre las moléculas del ligante y da lugar a una dispersión de la mezcla, pero por otra parte también puede romper los enlaces entre los áridos por solubilidad de estos.

Los mecanismos que contribuyen al daño producido por este fenómeno son el desprendimiento, el desplazamiento, la emulsificación espontánea, la presión en los poros y el lavado hidráulico que pueden actuar por separado o de forma conjunta.

El desprendimiento es la separación microscópica de la película de ligante de la superficie del árido por una delgada capa de agua sin la ruptura de la película de ligante.

El desplazamiento se da lugar cuando el ligante es eliminado de la superficie del árido por el agua. La diferencia con el fenómeno de desprendimiento se basa en que en este caso el agua libre llega hasta el árido a través de alguna pequeña rotura en la película de ligante. Esta grieta puede deberse a que durante la mezcla el árido no ha sufrido un revestimiento completo, a la existencia de partículas de polvo en los áridos o a ciclos de congelación y descongelación (Kiggundu et al 1988, Little 2003, viswanathan 2005).

La emulsificación espontánea es un fenómeno que se produce cuando se forma una emulsión inversa de gotas de agua en el ligante debido a que se encuentren minerales de arcilla en la mezcla.

El efecto de la presión en los poros está causado por el agua que queda atrapada en los vacíos de aire que hay en la mezcla, factor significativamente importante en mezclas abiertas, y las cargas producidas por la acción del tráfico que puede producir una presión suficientemente elevada como para que se dé una ruptura en la capa de ligante (Qing et al., 2005).

El lavado hidráulico se da por el paso de vehículos pesados sobre la carretera cuando está saturada, el agua crea una presión elevada en los huecos de la mezcla delante de la carga del neumático y sale de los poros cuando este pasa. Por este motivo en las zonas en que la carga del tráfico es más elevada el ligante puede llegar a ser eliminado (Kim et al., 2004).

Por estos motivos analizaremos, si es posible, aquellos ensayos de abrasión que determinan el efecto del ravelling cuando las probetas de mezcla asfáltica han sido sometidas al fenómeno del agua, para así poder comprobar que la pérdida de material que se produce en estas muestras es mayor que la pérdida en mezclas que no han sido afectadas por el agua (Ensayos Cántabro por vía húmeda 3.3, y abrasión de lechadas bituminosas por vía húmeda 3.4).

CAPÍTULO 3 ENSAYOS DE ABRASIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente la normativa española no recoge ningún ensayo que evalúe la abrasión producida en mezclas bituminosas para las capas de rodadura de las carreteras debido a la acción del tráfico, sin embargo existen algunos que están relacionados con la pérdida de material en las mezclas como el ensayo Cántabro o el ensayo de abrasión en lechadas, que evalúa la abrasión pero solo en el caso de emplear lechadas bituminosas.

Por este motivo, en este capítulo se hace una revisión bibliográfica de los diferentes ensayos de abrasión que existen en diferentes países analizando sus características con el objetivo de proponer un nuevo ensayo que recoja los aspectos más ventajosos de cada uno de ellos.

3.2 ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE

Antecedentes

El ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste se desarrolló en 1979 en el Laboratorio de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Santander, con el objetivo de caracterizar las mezclas bituminosas de granulometría abierta para capas de rodadura.

La finalidad del ensayo consistía en evaluar la cohesión y la resistencia a la disgregación en mezclas porosas, principal fallo de este tipo de mezclas, debido a que los ensayos que se realizaban tradicionalmente en las mezclas convencionales estaban encaminados a medir la estabilidad y en ningún caso los fenómenos descritos anteriormente.

Debido a la escasa información que se obtenía, en cuanto a cohesión, con los ensayos tradicionales se consideró someter a probetas fabricadas en el compactador Marshall a un ensayo similar al ensayo «Los Angeles» con el fin de determinar la pérdida por desgaste de las mezclas bituminosas porosas debido a los efectos abrasivos y de succión originados por el tráfico.

Este ensayo queda recogido en la normativa española como NLT-352/86 «Ensayo cántabro de pérdida por desgaste»

Descripción del ensayo

El ensayo consiste en fabricar un probeta tipo Marshall de acuerdo con la norma NLT-159, con la mezcla que se quiera estudiar, e introducirla en la máquina de ensayo de los Angeles sin la carga abrasiva de las bolas a una temperatura dada, generalmente comprendida entre 15 y 30 °C.

Primero se pesa la probeta en seco, con una aproximación de 0,1 gramos, antes de ser introducida en el tambor, una vez realizado este paso se introduce en la máquina y se hace girar el tambor a una velocidad de 3,1 a 3,5 rad/s durante 300 revoluciones.

Una vez acabado el proceso, se retira la probeta que ha ido perdiendo material debido al desgaste de los áridos en la superficie y se vuelve a pesar, de nuevo con una aproximación de 0,1 gramos.

Este proceso se repetirá para cuatro probetas con el mismo contenido de ligante y se obtiene la pérdida por desgaste para cada probeta con la siguiente expresión:

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

Donde:

P = valor de la pérdida por desgaste en %.

P_1 = masa inicial de la probeta, expresada en gramos.

P_2 = masa final de la probeta, expresada en gramos.

Finalmente para obtener el resultado final se calcula el valor medio de todas las probetas ensayadas y se obtiene el valor de la pérdida por desgaste expresada en tanto por ciento del peso inicial.

La máquina utilizada en el ensayo, es la misma que se emplea en el ensayo de desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Angeles (NLT-149/72), pero sin la carga abrasiva de las bolas. Las características de esta máquina están definidas en el apartado 2.1 de la Norma NLT-149. Podemos ver sus componentes de forma más detallada en las siguientes figuras.

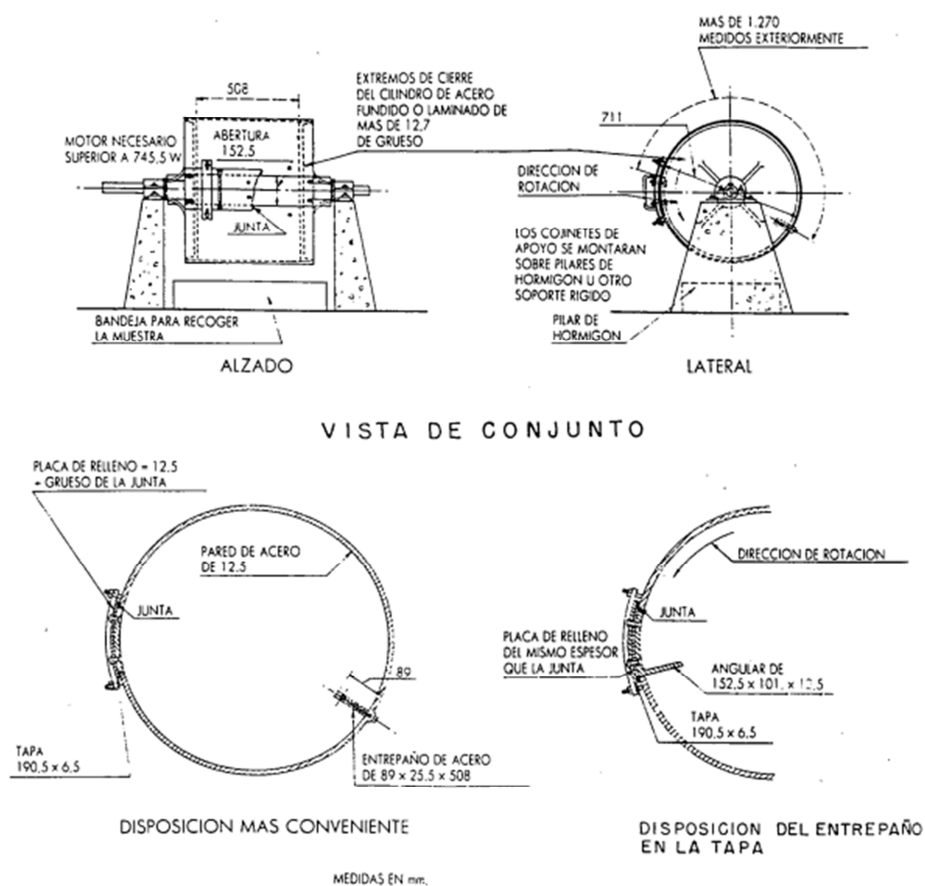


Figura 8. Máquina de Los Angeles (Calzada Pérez, 1984).

Para la correcta realización de este ensayo se debe mantener la temperatura constante durante el proceso. Para ello se deberá disponer de una cámara en la cual se pueda regular la temperatura y donde colocar la máquina de Los Angeles.

Resultados del ensayo

Tras experimentar este ensayo en una serie de 54 probetas (Pérez Jimenez 1980) con diferentes granulometrías y contenidos de ligante, se llegó a la conclusión de que éste es un método capaz de detectar pequeñas variaciones en la composición de la mezcla bituminosa sobre todo cuanto se varía el contenido de betún.

Se observa que para una mezcla dada existe una disminución en la pérdida de material por desgaste cuanto mayor es el contenido de betún ya que éste le da más cohesión a la mezcla, podemos observarlo en la siguiente tabla.

P-12 (15,6)			
% BETUN	ALTURA (cm)	% HUÉCOS	% PERDIDA
3,5	5,62	17,8	27,2
3,5	5,58	17,1	19,6
3,5	5,57	16,8	26,1
4,5	5,56	15,4	17,1
4,5	5,51	14,2	13,7
4,5	5,61	16,0	21,7
5,5	5,50	12,5	12,0
5,5	5,44	11,7	10,3
5,5	5,54	12,5	16,1

P-12 (10,6)			
% BETUN	ALTURA (cm)	% HUÉCOS	% PERDIDA
3,5	5,77	21,1	43,1
3,5	5,87	21,6	36,0
3,5	5,81	20,6	32,2
4,5	5,68	17,8	29,2
4,5	5,73	17,8	26,4
5,5	5,70	16,3	26,6
5,5	5,67	15,8	25,9

Tabla 2. Características de las mezclas ensayadas con tamaño máximo de 12,5mm (Calzada Pérez, 1984).

En esta tabla también podemos observar como a medida que aumentan los huecos en la mezcla, la disgregación del material es más elevada como se había comentado en el capítulo 2.2 *mezclas discontinuas*. Por lo tanto cuanto más abierta sea la mezcla más aumentara la disgregación de la probeta para un mismo contenido de betún.

Además del contenido de ligante, también se estudió como afectaba la temperatura de las probetas en la pérdida de material.

MEZCLAS	% BETUN s/a	TEMPERA TURA	HUECOS	% PERDI DA PESO
P-10 (5,4)	3,5	12	24,8	80,9
P-10 (5,4)	3,5	28	24,6	54,3
P-10 (5,4)	5,5	12	21,3	48,9
P-10 (5,4)	5,5	28	21,4	26,2

Tabla 3. Influencia de la temperatura en el ensayo Cántabro (Calzada Pérez, 1984).

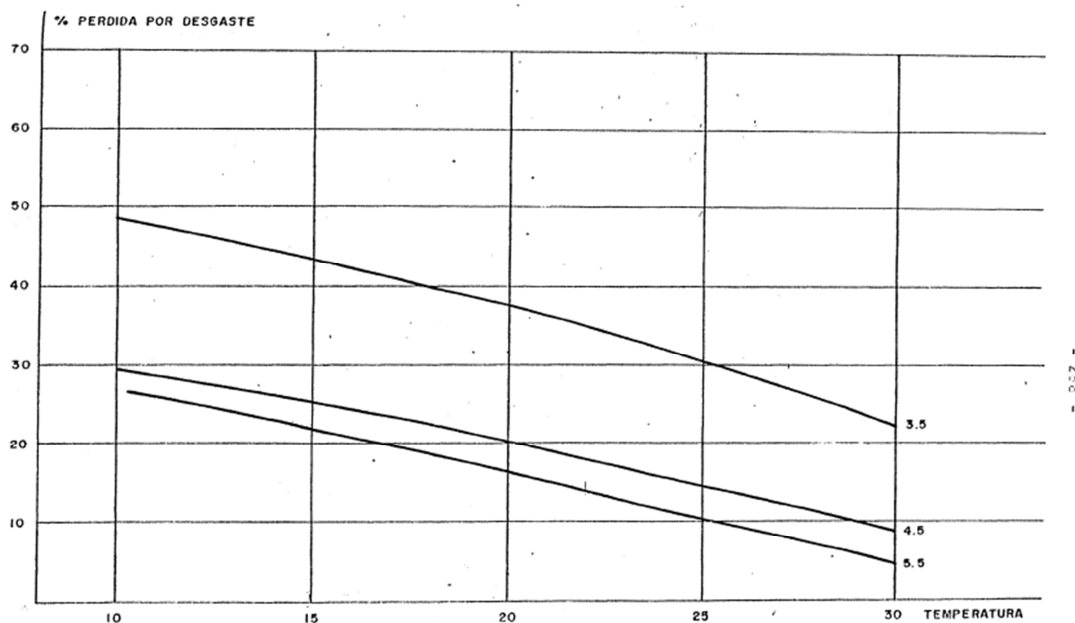


FIG. 5.2 .- VARIACIÓN DE LA PERDIDA POR DESGASTE CON EL CONTENIDO DE LIGANTE Y LA TEMPERATURA. GRANULOMETRIA P-10 (15,4)

Figura 9. variación de la pérdida por desgaste con la temperatura (Calzada Pérez, 1984).

Como se puede observar el aumento de temperatura tiene un efecto reductor de la pérdida de material ya que debido a la disminución de viscosidad que provoca, hace que la mezcla sea más flexible y por tanto menos sensible al desgaste que provoca este ensayo. En conclusión, el empleo de betunes más viscosos, aumenta la fragilidad del ligante y reduce la resistencia a la disgregación de la mezcla por desgaste.

Conclusiones relativas al ensayo

En conclusión el ensayo Cántabro de Pérdida por Desgaste se ha mostrado como un ensayo rápido, sencillo y suficientemente sensible para evaluar las propiedades del ligante en cuanto a cohesión, adhesividad, susceptibilidad térmica y disgregación del material. Pero cabe destacar que la pérdida de árido en este ensayo se debe al impacto que produce cada revolución del tambor sobre la mezcla, con lo cual se detecta el porcentaje de partículas que están mal adheridas, pero el motivo por el cual se produce esta pérdida no está directamente relacionado con la abrasión que provocaría el paso de vehículos sobre la capa de rodadura del firme que es el objeto principal de este estudio.

3.3 ENSAYO CÁNTABRO DE PÉRDIDA POR DESGASTE POR VÍA HÚMEDA

Antecedentes

El ensayo Cántabro de pérdida por desgaste por vía húmeda fue desarrollado en el marco español basándose en los estudios y trabajos realizados en la Cátedra de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Catalunya en 1991. El principal objetivo es valorar la pérdida de cohesión que se produce por la acción del agua en mezclas bituminosas y el efecto que produce el empleo de ligantes modificados en la mejora de esta propiedad.

El procedimiento se aplica en mezclas bituminosas de granulometría abierta fabricadas en frío o en caliente, con ligantes bituminosos modificados o no de tamaño máximo de partículas de árido de 25mm.

Mediante la aplicación de este ensayo se obtiene un índice numérico del aumento de pérdida de masa debido al desgaste, comparando probetas que han sido sumergidas en agua y otras que no. Es decir se evalúa el incremento de pérdida de material que provoca someter a una probeta a los efectos del agua.

Este ensayo está recogido en la normativa española como NLT-362/92 «Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste»

Descripción del ensayo

En el ensayo se fabrican una serie de probetas tipo Marshall, según la normativa NLT-159, y se dividen de forma aleatoria en dos grupos de forma que ambos contengan el mismo número de muestras.

Una vez divididas se pesan con una aproximación de 0,1 gramos y se anota como p_i . Uno de los grupos se coloca en una estufa a $25\pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas, mientras que las probetas del otro grupo se sumergen 24 horas en agua, la temperatura de la cual variará en función de si se trata de una mezcla en frío o en caliente. Para mezclas bituminosas fabricadas en frío la temperatura del baño de agua deberá ser de $45\pm 1^\circ\text{C}$, y aquellas muestras que han sido fabricadas en caliente se sumergirán en agua a temperatura de $60\pm 1^\circ\text{C}$.

Una vez pasado este tiempo se sacan las probetas del baño y se mantienen 24 horas en un recinto a temperatura $25\pm 1^\circ\text{C}$ con ventilación forzada. Más tarde se determina la masa de nuevo de los dos grupos de probetas y se anota como p_c . La

diferencia de masa, si la hubiera, entre p_1 y p_c representa la masa de agua retenida por la probeta después del período de secado. Esta diferencia se tendrá en cuenta en el posterior cálculo restándola a p_2 .

Seguidamente introducimos las probetas en la máquina de Los Angeles, donde el número de ciclos será 300 para mezclas en caliente y 200 para mezclas en frío. Tras realizar este proceso, se sacan las muestras de la máquina y se anota de nuevo el peso de las muestras como p_2 con una aproximación de 0,1 gramos.

La pérdida por desgaste producida en cada probeta se calculara con la siguiente expresión:

$$P = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100$$

Dónde:

P= valor de la pérdida por desgaste en %.

P₁= masa inicial de la probeta, expresada en gramos.

P₂= masa final de la probeta, expresada en gramos.

Una vez obtenidas las pérdidas de cada probeta se hace la media de cada grupo, donde se denominará P_A el grupo de muestras conservadas en aire y P_S el grupo sumergido en agua.

El índice de aumento de pérdidas refleja el porcentaje en que la pérdida de material debido a la acción del agua aumenta respecto a muestras que no han sido afectadas por este fenómeno y se calcula con la siguiente expresión:

$$I_p = \frac{P_S}{P_A} * 100$$

Resultados del ensayo

En el año 2012 se realizó un análisis del efecto que tenía el filler sobre las propiedades de cohesión y adhesividad en el mástico de una mezcla. Este trabajo fue desarrollado en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Infraestructura del Transporte y del Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña por los doctores Pérez Jiménez y Miró Recasens.

Se trata de mezclas abiertas con unas porosidades comprendidas entre 15-25%, con diferentes tipos de filler como cemento, cal, carbonato cisne y carbonato calcinor

que fueron comparados entre ellos para evaluar la susceptibilidad que tenían a los efectos del agua en cuanto a disgregación de partículas. En las *tablas 4 y 5* se muestran los resultados del ensayo Cántabro por vía seca y húmeda respectivamente.

C_v/C_c	0,5			1,0			1,5		
PÉRDIDAS (%)	15,01	14,30	16,49	12,66	13,64	13,77	14,68	15,47	n/v
MEDIA (%)	15,27			13,36			15,08		

*Tabla 4. Ensayo Cántabro por vía seca, mezcla con filler cal.
(A. Martín Sánchez, 2012).*

C_v/C_c	0,5			1,0			1,5		
PÉRDIDAS (%)	64,02	63,98	61,68	57,83	51,30	65,79	31,60	26,95	28,88
MEDIA (%)	63,23			58,31			29,28		

*Tabla 5. Ensayo Cántabro por vía húmeda, mezcla con filler cal.
(A. Martín Sánchez, 2012).*

Comparando los resultados anteriores podemos ver que para el mismo tipo de mezcla abierta con un contenido medio de poros del 27%, el efecto que tiene el agua sobre la disgregación de partículas de árido se ve aumentada en un 50, 45 y 15 % de la pérdida de masa respectivamente para las combinaciones de C_v/C_c .

Repetimos la misma observación para el resto de tipos de filler para asegurarnos de los resultados anteriores. Las siguientes tablas son un resumen de los resultados obtenidos en el estudio del Laboratorio de Caminos de 2012.

Filler carbonato cisne			
C_v/C_c	0,5	1	1,5
%huecos	27,6	26,3	25
Pérdidas (seco)	13,89	11,49	8,58
Pérdidas (húmedo)	53,94	38,93	24,13

*Tabla 6. Ensayo Cántabro por vía húmeda, mezcla con filler carbonato cisne.
(A. Martín Sánchez, 2012).*

Filler carbonato calcinor			
C_v/C_c	0,5	1	1,5
%huecos	26,4	23,8	20,7
Pérdidas (seco)	14,17	10,35	11,97
Pérdidas (húmedo)	50,20	29,76	31,74

*Tabla 7. Ensayo Cántabro por vía húmeda, mezcla con filler carbonato calcinor.
(A. Martín Sánchez ,2012).*

Filler cal			
C_v/C_c	0,5	1	1,5
%huecos	28,3	27,7	27,3
Pérdidas (seco)	15,27	13,36	15,08
Pérdidas (húmedo)	63,23	58,31	29,28

*Tabla 8. Ensayo Cántabro por vía húmeda, mezcla con filler cal.
(A. Martín Sánchez ,2012).*

Filler de recuperación			
C_v/C_c	0,5	1	1,5
%huecos	28,2	26,6	25
Pérdidas (seco)	14,11	10,67	10,33
Pérdidas (húmedo)	70,93	62,15	32,65

*Tabla 9. Ensayo Cántabro por vía húmeda, mezcla con filler de recuperación.
(A. Martín Sánchez ,2012).*

Filler carbonato cemento			
C_v/C_c	0,5	1	1,5
%huecos	27,8	26,9	25,4
Pérdidas (seco)	12,96	11,51	9,61
Pérdidas (húmedo)	50,66	32,37	22,99

*Tabla 10. Ensayo Cántabro por vía húmeda, mezcla con filler carbonato cemento.
(A. Martín Sánchez ,2012).*

Podemos comprobar que la disgregación de partículas en muestras ensayadas con la máquina de Los Angeles se incrementa significativamente cuando las muestras han sido sumergidas en agua durante 24 horas. Este efecto se debe a que el agua como ya habíamos explicado en el *capítulo 2.4* tiene consecuencias negativas en la mezcla ya que acaba con la adherencia entre el ligante y el árido, y esto conduce a que algunas partículas se pueden disgregar de la mezcla con mayor facilidad. Además podemos ver en los resultados que a medida que el contenido de poros en la mezcla aumenta la pérdida también lo hace, ya que esta es más susceptible a los efectos que tiene el agua y el contacto entre partículas es menor, lo cual disminuye más la cohesión.

Conclusiones relativas al ensayo

El ensayo Cántabro de pérdida por desgaste por vía húmeda igual que el mismo ensayo en seco es un test sencillo y suficientemente preciso como para medir las propiedades de cohesión y adhesividad de la mezcla, y además permite evaluar de manera eficaz y precisa el efecto disgregador que tiene el agua sobre las partículas en mezclas bituminosas abiertas. Sin embargo solo nos sirve para ver esta última propiedad ya que como se concluyó en el ensayo Cántabro en seco, este procedimiento mide el porcentaje en masa de partículas disgregadas de la mezcla debido al impacto que produce la mezcla en el tambor cuando este gira, pero no simula la abrasión que el paso de vehículos produce en la carretera.

3.4 ABRASIÓN POR VÍA HÚMEDA DE LAS LECHADAS BITUMINOSAS

Antecedentes

El ensayo de abrasión por vía húmeda de las lechadas bituminosas o también conocido como Wet Track Abrasion Test, establece el método para determinar la resistencia al desgaste de lechadas bituminosas bajo las acciones abrasivas del tráfico en condiciones húmedas para establecer el contenido mínimo de emulsión admisible en la mezcla.

Las lechadas bituminosas son mezclas fabricadas a temperatura ambiente que se componen de una emulsión bituminosa, áridos, agua y a veces polvo mineral de aportación y adiciones que acostumbra a emplearse en tratamientos superficiales de mejora de la textura superficial o sellado de pavimentos.

El ensayo se recoge en las siguientes normativas:

NLT-320/87 «Abrasión por vía húmeda de las lechadas bituminosas».

ISSA Test Method N.º 100, «Wet track abrasion of slurry seals», 1978.

ASTM D 3910-84 «Practice for Design, Testing, and Construction of Slurry Seal».

Descripción del ensayo

El ensayo de abrasión por vía húmeda de las lechadas bituminosas consiste en someter a una probetas circulares de lechada, curadas previamente a 60°C y sumergidas en agua, a la acción abrasiva de una goma que gira sobre la muestra con un movimiento de giro de dos ejes paralelos. El ensayo se aplica durante cinco minutos mientras que la probeta permanece sumergida en agua a una temperatura de 25°C, dónde la resistencia a la abrasión vendrá definida por la pérdida de peso de la muestra después del ensayo.

El ensayo consiste en fabricar tres probetas circulares de 27cm de diámetro y 5mm de espesor que son curadas a una temperatura de 60°C durante un período de entre 15 y 24 horas, hasta peso constante. Una vez acabado este tiempo se deja enfriar la probeta y el soporte y se pesa anotando el valor. Más tarde se introduce el conjunto de probeta y soporte en un baño de agua auxiliar a 25°C durante 60-75 minutos.

Una vez transcurrido este tiempo se coloca finalmente la probeta en el baño del ensayo fijándola a la base por tres tornillos, teniendo en cuenta que la muestra debe quedar completamente cubierta por el agua.

Tras colocar la muestra ponemos en funcionamiento la máquina de abrasión durante cinco minutos y al finalizar se limpia la probeta y se pesa de nuevo en aire.

La máquina de abrasión, consta de un motor eléctrico que hace girar mediante un sistema planetario un eje vertical de ensayo con un doble movimiento, rotación y circular de translación. En el extremo inferior de este se encuentra el cabezal de abrasión, que es la parte que roza directamente sobre la probeta. El cabezal está compuesto por una manguera de goma reforzada de $19 \pm 0,5$ mm de diámetro interior y 31 mm aproximadamente de diámetro exterior y una longitud de 127 mm. Para que la máquina provoque un efecto abrasivo en la mezcla, el cabezal deberá girar a una velocidad de 144 revoluciones por minuto aproximadamente durante 61 vueltas planetarias aplicando a la muestra una fuerza vertical de 22,3 N. Podemos ver una imagen de un esquema detallado del cabezal y la máquina de abrasión en las *figuras 10 y 11* respectivamente.

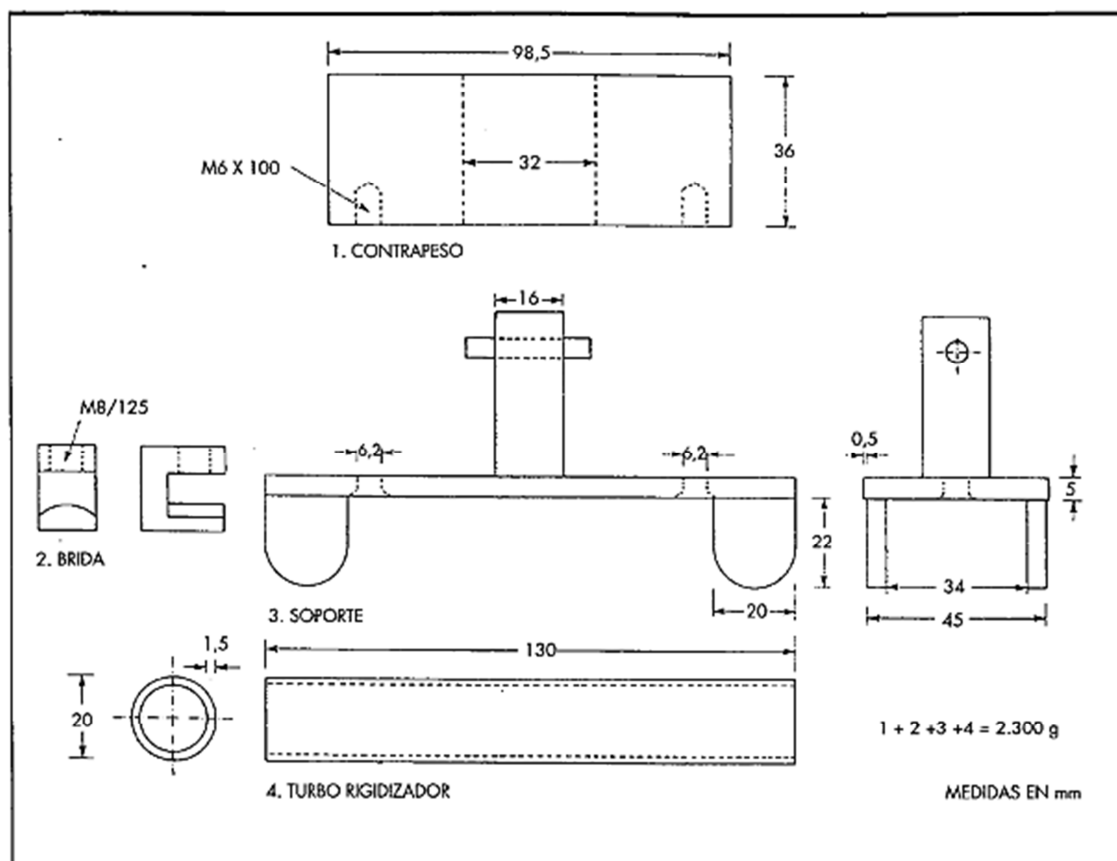


FIGURA 1. Cabezal de abrasión.

Figura 10. Esquema detallado del cabezal de abrasión (NLT-320/87).



Figura 11. Máquina de abrasión de lechadas (mastrad.com).

Finalmente la abrasión producida en cada probeta, en gramos, se obtiene mediante la diferencia entre la masa inicial de la probeta junto al soporte menos la masa del mismo conjunto después de finalizar el ensayo. El valor que se obtiene se multiplica por el factor de conversión 32,9 para poder obtener la pérdida en g/m^2 .

Por tanto el valor final del desgaste producido por abrasión se calculará como el valor medio de las tres probetas ensayadas.

Resultados del ensayo

Mediante el ensayo de algunas probetas de lechadas bituminosas se ha probado que la tendencia de la curva típica de la pérdida de material por abrasión de las lechadas bituminosas según el contenido de emulsión que contengan tiene la siguiente forma:

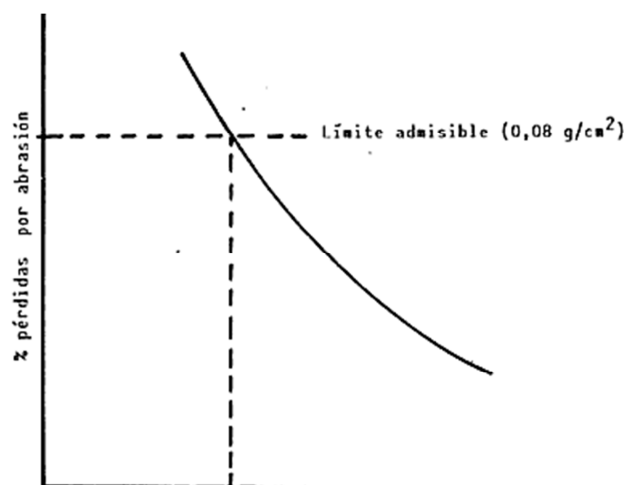


Figura 12. Curva típica obtenida en el ensayo WTAT (Fernández del Campo, 1979).

Dónde podemos ver que la pérdida de partículas de árido disminuye cuanto mayor es el contenido de emulsión. Es decir, cuanto mayor sea la película que recubre las partículas de árido más difícil resulta que estas partículas se disgreguen de la mezcla. Lo cual resulta totalmente lógico con lo explicado en el capítulo 2.

Otros estudios como el realizado en Caltrans (2002) [16], en el que se estudió la abrasión en diversas muestra de lechadas bituminosas, volvemos a ver la tendencia que las muestras sufren en el aumento de pérdida de material con la disminución del contenido de emulsión bituminosa.

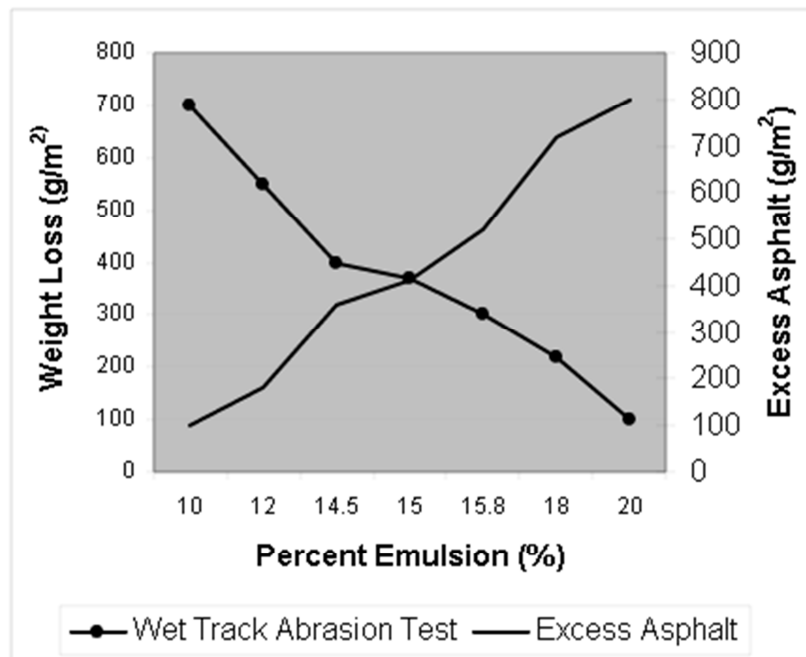


Figura 13. Pérdida de material- contenido de emulsión (Caltrans, 2002).

Otro ejemplo es el de las carreteras Argentinas, allí la mayoría de ellas habían sido concesionadas y las administraciones decidieron condicionarlas debidamente para alargar su vida útil realizando rehabilitaciones superficiales periódicamente. Para ello era necesaria la explotación de nuevas canteras o la sobreexplotación de las ya existentes, pero esto suponía un gran impacto ambiental. Por este motivo se decidió implementar el uso de asfaltos reciclados [21].

De esta forma, se hizo un estudio de laboratorio con mezclas en frío con alto contenido en material reciclado, RAP, con el objetivo de evaluar su resistencia a la abrasión para poder utilizarlas en tratamientos superficiales.

En las *tablas 11 y 12* se presentan las dosificaciones de las lechadas con RAP con dos porcentajes de emulsión, 9 y 7 % respectivamente, y en las *tablas 13 y 14* sus correspondientes resultados tras ser ensayadas con el Wet Track Abrasion Test.

	CURVA 3 Agregados recuperados	Dosificación 9%
TAMIZ	% PASA	Cal 1%
3/8	100	Agua 7%
1/4	85	Emulsión 9%
4	79	
8	62	
16	49.8	
30	38.5	
50	28	
100	16	
200	8.6	

Tabla 11. Dosificación mezcla RAP 9% emulsión (Botasso H., 2008).

	CURVA 3 Agregados recuperados	Dosificación 7%
TAMIZ	% PASA	Cal 1%
3/8	100	Agua 8%
1/4	85	Emulsión 7%
4	79	
8	62	
16	49.8	
30	38.5	
50	28	
100	16	
200	8.6	

Tabla 12. Dosificación mezcla RAP 7% emulsión (Botasso H., 2008).

CURVA 3 con 9% de emulsión	Pi	Pf	Perdida	perdida gr/m²	
1	1320.8	1318	2.8	105	Promedio
2	1328	1325.8	23	112	112.5 gr/m ²
3	1367.2	1365.2	2	75	

Tabla 13. Resultado WTAT mezcla RAP 9% emulsión (Botasso H., 2008).

CURVA 3 con 7% de emulsión	Pi	Pf	Perdida	perdida gr/m²	
1	1312	1309	3	112.5	Promedio
2	1285	1280	5	187.5	137.5 gr/m ²
3	1291	1288	3	112.5	

Tabla 14. Resultado WTAT mezcla RAP 7% emulsión (Botasso H., 2008).

Se comprueba, por tanto, que la diferencia en el contenido de emulsión de las diferentes muestras ensayadas con igual granulometría afecta de forma notable a la disgregación de la mezcla por abrasión. Las mezclas con alto contenido en emulsión sufrirán menos disgregación de partículas debido a que la película que la emulsión forma alrededor del árido será mayor, es decir, la emulsión rodea por completo la superficie de las partículas aumentando la resistencia que éstas presentan ante el ravelling.

Conclusiones relativas al ensayo

Mediante el uso de este ensayo es posible determinar la resistencia a la acción abrasiva de un rodillo de goma con un movimiento circular que simula la acción de los neumáticos en la circulación. El ensayo se lleva a cabo por vía húmeda lo que da lugar a que se pueda contemplar el efecto negativo del agua en las lechadas.

Además este ensayo nos proporciona información sobre el contenido de emulsión necesaria para que el desgaste no sea superior a un valor deseado, con lo que se puede determinar de forma aproximada el daño que sufrirá la capa de lechada en su puesta en servicio.

Sin embargo, si en lugar de utilizar lechadas se ensayasen otro tipo mezclas bituminosas como las SMA o BBTM el efecto que el rodillo produciría sobre la mezcla no sería apreciable ya que éstas presentan más resistencia que las lechadas. Es decir, el diseño de la máquina de abrasión no es aplicable a otro tipo de mezclas debido a que la fuerza que se aplica sobre la probeta no es adecuada para mezclas que sean más duras.

En conclusión, el método de abrasión de lechadas bituminosas por vía húmeda simula de forma bastante acertada el efecto abrasivo del tráfico, mediante el uso de un cabezal rotativo de goma, pero no es aplicable a otras mezclas bituminosas, como el caso de las discontinuas y templadas, a no ser que se desarrolle la máquina de abrasión incrementando la presión que el cabezal ejerce sobre la muestra.

3.5 ROTATING SURFACE ABRASION TEST

Antecedentes

El Rotating Surface Abrasion Test o RSAT fue desarrollado por una empresa contratista holandesa, Breijn-Heijmans, con el fin de estudiar la resistencia al ravelling en mezclas asfálticas porosas (PA) para capas de rodadura de carreteras.

La finalidad del ensayo es calcular la pérdida de partículas de árido en mezclas bituminosas mediante una rueda de goma de neumático en movimiento que simula el paso de los vehículos por la carretera. Además de esta propiedad este ensayo también puede evaluar el ahuellamiento producido por el tráfico en la capa de rodadura.

Descripción del ensayo

En el test una probeta octogonal de 180mm de lado y 50mm de altura de mezcla bituminosa porosa (PA) está cargada con una rueda de neumático sólido que se mueve hacia adelante y atrás 3607 revoluciones por hora, lo que significa que la rueda pasa 690 veces por la misma posición. La carga vertical de la rueda somete a la probeta a una presión de 0,6 MPa (parecida a la carga que ejerce la rueda de un camión sobre el pavimento) y para simular la circulación de los vehículos, la rueda está girada 33,7° respecto a la dirección vertical del movimiento. Toda la muestra está sometida a esta carga debido a que el plato en el que está colocada la probeta va rotando a una velocidad de 496 revoluciones por hora, de esta forma se consigue que la muestra esté uniformemente cargada. La acción abrasiva del neumático, constante durante 24 horas, reproduce los daños que el pavimento sufriría durante 7 años desde su puesta en servicio.

El ensayo se lleva a cabo a una temperatura de 20°C durante 24 horas durante las cuales la pérdida de material, que se produce debido al efecto abrasivo del neumático, es recogido continuamente por una pequeña maquina aspiradora. La *figura 15* muestra el tipo de máquina de abrasión y el aspirador.



Figura 15. Máquina de abrasión RSAT (Breijn, 2006)

Los resultados de este ensayo se determinan por el conjunto de partículas de árido desprendidas de la muestra que tengan un tamaño superior a 2mm, ya que se considerada como daño producido por ravelling. Estos resultados se expresan como la media de las pérdidas en las probetas ensayadas en gramos. La *figura 16* muestra una probeta después de la pérdida de material en el ensayo.



Figura 16. Probeta con pérdida de árido después del ensayo RSAT (Quantao Liu, 2012).

Resultados del ensayo

Se experimentó este ensayo en los laboratorios de Heijmans-Breijn en Rosmalen de una mezcla porosa tipo PA0/16 con un contenido en betún del 5,2% del cual el 4% era aditivo tipo (fibras de acero) con la siguiente granulometría.

Material	Size mm	Passing percentage %	Specification
Stones	16	97.7	93-100
	11.2	69.8	64.0-76.0
	8	34.7	-
	5.6	20.5	-
Sand	2	16.0	11.0-19.0
Filler	< 0.036	4.5	3.0-6.0
Bitumen	5.2% of the total weight of stone, sand and filler		B _{min} 4.5
Steel wool	4% of the volume of bitumen		

Tabla 15. Composición de la mezcla ensayada por Heijmans-breijn. (Heijmans-breijn, 2006).

Con los datos obtenidos de las pérdidas de material se obtuvo una curva que refleja cómo se va perdiendo el árido durante el ensayo *figura 17*. Como se puede ver la pérdida es consistente con el proceso de ravelling: el desprendimiento de partículas empieza de forma lenta y se acelera rápidamente después de un cierto tiempo.

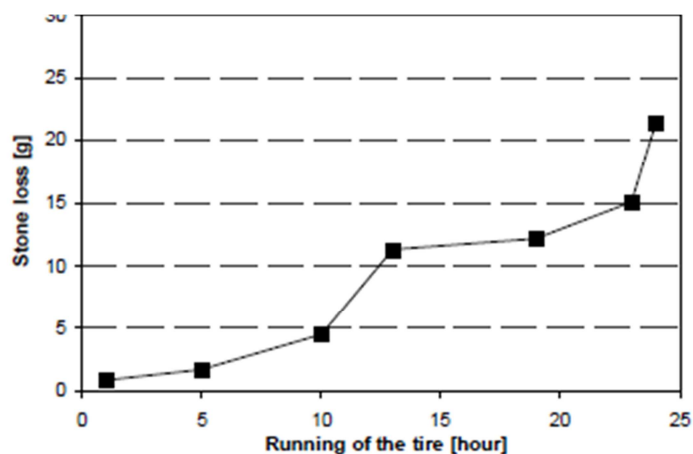


Figura 17. Pérdida de material RSAT en el tiempo (Quantao Liu, 2012).

Algunos de los resultados obtenidos más específicamente están descritos en la siguiente tabla.

Sample	Slab 1	Slab 2	Slab 3	Average
plain	5.32 g	3.82 g	24.18 g	11.11 g

Tabla 16. Pérdida de material con el ensayo RSAT (Quantao Liu, 2012).

Suponiendo que la densidad de las mezclas sea de media de 2 g/cm^3 , como conocemos el volumen de la probeta, podemos aproximar en porcentaje las pérdidas para futuras comparativas en este trabajo. Se resume en la siguiente tabla.

PA 0/16 con 5,2% betún		
Probeta	Pérdida(g)	Pérdida (%)
Slab 1	5,32	0,05
Slab 2	3,82	0,04
Slab 3	24,18	0,22
Media	11,1	1,12

Tabla 17. Resultados del RSAT en %.

Este mismo ensayo fue realizado en dos tramos de autopista en Holanda, concretamente en la A50 y A73 en mezclas asfálticas porosas mejoradas con aditivos rejuvenecedores con el objetivo de comprobar si éstos eran capaces de aumentar la vida útil de este tipo de mezclas, según Hofman [23] la media es de 8 años de vida útil desde su puesta en servicio.

Tras realizar el test durante 24 horas, a una temperatura de 20°C , los resultados obtenidos en los diferentes tramos fueron los descritos en las tablas 18 y 19, donde las probetas marcadas con “R” por ejemplo A50-R son aquellas que no estaban tratadas con rejuvenecedores y el resto pertenecen a las que fueron modificadas con estos aditivos.

Cada tramo de la carretera fue ensayado con tres probetas con excepción del tramo A50-P2.

Section	A50-R			A50-P1			A50-P2		A50-P3		
Total test time (hour)	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Cumulative loss of stone (g)	0.9 8	3.0 7	6.32	5.5 3	0.6 1	0.0 9	1.62	3.1 1	0.57	0.4 7	2.1 4
Average value of the loss (g)	3.46			2.08			2.37		1.06		

Tabla 18. Resultados de RSAT para probetas de A50 a 20°C (Sustainable Construction Materials 2012).

Section	A73-R				A73-P1		A73-P2	A73-P3	
Total test time (hour)	5	24	24	24	24	17	24	24	24
Cumulative loss of stone (g)	57.05	64.51	22.80	28.50	12.29	41.54	34.63	6.93	29.47
Gradient loss of stone (g/h)	11.41	2.69	0.95	1.19	0.51	2.44	1.44	0.29	1.28
Average value of the loss per	4.06				1.48		1.44	0.79	

Tabla 19. Resultados de RSAT para probetas de A73 a 20°C (Sustainable Construction Materials 2012).

Conclusiones relativas al ensayo

El Rotating Surface Abrasión test es un ensayo en el cual se simula de forma muy aproximada el efecto que tiene el paso de los neumáticos sobre el pavimento y el daño que estos producen, en cuanto al desprendimiento de árido debido al ravelling.

Sin embargo, como hemos podido comprobar los resultados obtenidos con este ensayo son relativamente pequeños respecto a lo que se podría esperar de una mezcla porosa con el contenido de betún indicado en el ensayo. Pero no disponemos de la suficiente información para saber si el test es suficientemente sensible a la abrasión o por el caso contrario no lo es.

El test evalúa la diferencia que existe entre diferentes mezclas bituminosas, nos permite conocer si un aditivo favorece o desfavorece el daño producido en el pavimento. Como indica las tablas X Y se comprueba que las mezclas modificadas con rejuvenecedores resultan tener en media menos daños que las mezclas que no han sido

tratadas [22]. Pero no da un resultado aproximable al daño que sufriría una carretera al cabo de 7 años sometida a circulación de vehículos.

Además, debido a la complejidad de fabricación de probetas, octogonales y que no pueden ser compactadas con los métodos tradicionales de acuerdo con la norma EN12697-33, se convierte en un ensayo muy costoso.

3.6 AACHENER RAVELLING TESTER (ARTe)

Antecedentes

El Aachener Ravelling Tester (ARTe) fue desarrollado en el instituto alemán Strassenwesen Aachen (RWTH) con el fin de evaluar el daño que sufrían un nuevo tipo de mezclas llamadas poroelásticas (PERS, poroelastic road surfaces). Son capas destinadas a rodadura que se fabrican utilizando granos de caucho, arena y ligante de poliuretano. Además, no sólo poseen un muy alto contenido de vacíos (> 20% Volumen), sino que también la elasticidad es sustancialmente más elevada debido a la utilización de granos de caucho. Esto se traduce en una notable disminución de las emisiones de ruido de 10 a 12 dB en las áreas de contacto entre los neumáticos y la carretera [27].

El ensayo ARTe trata de medir el daño que presentan este tipo de mezclas sobretodo en zonas en las que el efecto del ravelling es mayor, como por ejemplo en curvas donde las fuerzas que actúan sobre la capa de rodadura son mayores y aumentan la posibilidad de que el árido de la mezcla salte. Además de medir la pérdida de material el ensayo ARTe también mide la resistencia a las fuerzas cortantes.

Descripción del ensayo

En el ensayo ARTe una carga se aplica por medio de dos neumáticos de camiones, que giran alrededor de un eje vertical con una velocidad de rotación de 47 revoluciones por minuto. Sobre las ruedas se aplica una carga vertical de 2kN a través de los neumáticos, mientras que la placa donde está situada la muestra de la mezcla se mueve horizontalmente, a una velocidad de 9 revoluciones por minuto (0,3 m/s), bajo los neumáticos para distribuir de forma uniforme la carga en la probeta [26]. El movimiento de los componentes del ensayo queda descrito en la *figura 18*.

Se fabrican dos probetas de dimensiones 50x50 centímetros con un espesor de 8 centímetros

Las probetas ensayadas serán de tipo rectangular con un espesor de 30 mm, ensayándose dos muestras para cada tipo de mezcla que se desea estudiar.

En primer lugar se pesan las placas anotando su valor y se colocan en la base de la máquina de abrasión, fijándolas correctamente. Una vez colocadas y ajustadas se pone en funcionamiento la máquina durante una hora y una vez pasado este tiempo se sacan las muestras de la máquina y se vuelven a pesar.

Resultados del ensayo

En el laboratorio del instituto alemán RWTH se llevaron a cabo una serie de estudios con el objetivo de medir el daño producido por el ravelling en las carreteras alemanas, ya que se predecía que el volumen de vehículos pesados iba a aumentar considerablemente en años futuros.

Las muestras ensayadas fueron de tipo UTLAC 6.3, SMA 6.3 y SMA 10. Las mezclas *Ultra Thin Layer Asphalt Concrete* son mezclas de muy pequeño espesor con un gran alto contenido de emulsión bituminosa, alrededor del 62%, fabricadas a una temperatura de entre 60-80°C, es decir templadas. Estas mezclas se compactaron en una capa de espesor 30mm para ser ensayadas con posterioridad.

Los resultados del ensayo, tras 540 ciclos, resultaron los siguientes:

Type	Mix nº	Spec. 1 (in g/m ²)	Spec. 2 (in g/m ²)	mean (in g/m ²)	Relative deviation from mean value (in %)
SMA 10	1	87	29	58	50
	2	162	104	133	22
SMA 6.3	3	197	174	185	6
UTLAC 6.3	1	1325	1644	1484	11
	2	5203	6019	5611	7
	3	3090	2112	2601	19

Tabla 18. Resultados del ensayo ARTe (Joëlle De Visscher, 2012)

A partir de estos resultados se pudo ver que las mezclas SMA presentan una mayor resistencia al ravelling mientras que las UTLAC tenían una pérdida de material muy superior a las anteriores. Este hecho pone en relieve la diferente cohesión que presentan los ligantes bituminosos frente a las emulsiones, ya que como se explicó en el *capítulo 2* las emulsiones poseen menor capacidad cohesiva que los ligantes bituminosos convencionales.

Además se pudo observar que las mezclas con un tamaño máximo de árido superior tienen menor disgregación de material que las de menor tamaño máximo de árido ya que el contacto entre partículas en el primer caso es mayor y esta propiedad produce más resistencia a la disgregación.

Dentro de las mezclas tipo UTLAC 6.3 la mezcla 1 presentó mayor resistencia que la mezcla 2, hecho que ya se predecía debido a que la primera presentaba un mayor contenido de emulsión y menos contenido en huecos [26].

Finalmente se concluyó que a pesar de que el número de ensayos fueran limitados, la repetitividad del método ARTe era suficientemente buena para discriminar entre dos tipos de mezclas de diferente composición.

Conclusiones relativas al ensayo

Tras estudiar las características y resultados de este ensayo, se concluye que el método alemán Arte resulta ser un test muy realista que simula de forma muy precisa el efecto del ravelling en carreteras, sobretodo donde este daño se hace más intenso, mediante el giro de neumáticos sobre capas de asfalto relativamente finas con una carga distribuida en probetas de gran dimensión comparadas con las que se usan en otros ensayos.

La sensibilidad a la abrasión del ensayo es bastante significativa, ya que la fuerza que los neumáticos ejercen sobre las capas de asfalto es de magnitud considerable, que junto a la velocidad de giro de las ruedas permiten que la mezcla se disgregue con mayor facilidad.

Finalmente la simplicidad del ensayo alemán junto a los buenos resultados que presenta frente a la discriminación entre mezclas, en cuanto a contenido de ligante y huecos, lo convierte en un ensayo de abrasión muy efectivo y fácil de aplicar.

3.7 TIRE SWEEP TEST

Antecedentes

De entre todos los daños que sufren las capas de rodadura de carreteras el ravelling es uno de los más importantes y complejos de evaluar. Durante años se han propuesto muchos ensayos de laboratorio que miden este fallo pero muy pocos de éstos se pueden hacer in-situ y aún menos son los que predicen la evolución de este tipo de degradación del pavimento.

En este ensayo, desarrollado por los doctores Mauro D'Apuzzo y Pietro Giannattasio en Italia (2008) [29], se propone un procedimiento para medir el ravelling in-situ basado en el efecto abrasivo que provoca el giro de una rueda de neumático fijada que simula las maniobras de los vehículos en la carretera. Se emplea este tipo de método debido a que el frenado o las maniobras de giro en curvas cerradas pueden aumentar drásticamente las fuerzas tangenciales de transmisión en la interfaz-neumático-pavimento y por tanto incrementar la zona de carretera abrasada o disgregada.

Además este ensayo propone un modelo de iniciación y progresión del fenómeno de disgregación de partículas calibrado mediante observaciones visuales y, un parámetro que define el ravelling in-situ obtenido con el Tire Sweep Test.

Descripción del ensayo

El Tire Sweep Test consiste en el ensayo de una mezcla bituminosa abierta sometida al barrido de un neumático de vehículo mediante maniobras de giro en la capa de rodadura de la carretera que se quiere ensayar, mediante el uso de un vehículo real.

En primer lugar se mide la temperatura del pavimento y se coloca el vehículo sobre el tramo de carretera deseado. Una vez colocado, el giro de éste debe partir siempre de la dirección en que el plano de la rueda está alineado con el eje longitudinal del vehículo. La maniobra de giro se realiza primero en el sentido de las agujas del reloj y sigue por un segundo ciclo en el sentido contrario repitiendo este proceso hasta que la pérdida de material sea apreciable. El número veces que se repite este proceso depende de las siguientes condiciones:

- Si se realiza un primer giro seguido por otro en sentido contrario hasta llegar a la posición de partida, el ensayo ha sido repetido dos veces.
- Si se realiza un primer giro seguido por otro en sentido contrario y un último en el sentido del primero hasta llegar a la configuración inicial, entonces el ensayo ha sido repetido cuatro veces.
- Si se realiza un primer giro seguido por otro en sentido contrario, más un giro en el sentido del primero y un último en el sentido del segundo hasta llegar a la

configuración inicial, entonces el ensayo ha sido repetido cuatro veces (figura 20).

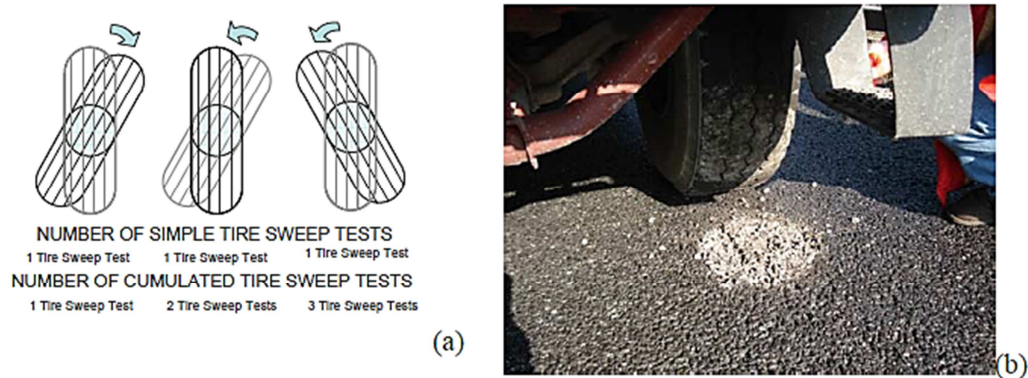


Figura 20. Número de repeticiones del Tire Sweep Test (a) y ejemplo de área abrasada por el mismo ensayo (b) (Mauro D'Apuzzo, 2012).

Después de cada ensayo, el vehículo es movido para poder medir la temperatura de la superficie de la carretera y recoger el material disgregado de la mezcla que se almacena cuidadosamente y se pesa.

Durante cada maniobra, el tiempo que se tarda en realizar el test es medido y cada maniobra es realizada por las dos ruedas delanteras del vehículo en diferentes áreas, las cuales no deben estar muy distanciadas ya que se quiere que las propiedades de la mezcla sean suficientemente parecidas en los diferentes puntos de ensayo.

Dependiendo de las condiciones del ensayo, tipo de mezcla y temperatura, podría ser necesario repetir el ensayo un número mayor o menor de veces para poder obtener una cantidad de masa apreciable de árido disgregado de la mezcla.

Una vez realizado el ensayo in-situ, el siguiente paso consiste en desarrollar un modelo regresivo para poder interpretar los resultados y cuantificar la susceptibilidad de la mezcla al ravelling. La evaluación de esta característica de la mezcla se basa en el siguiente modelo:

$$D=F(L,M)$$

Dónde D, el daño que se produce en la mezcla, depende de L que representa las acciones ejercidas por el neumático y M que es un descriptor sintético de las propiedades mecánicas de la mezcla bituminosa.

En lo que se refiere a los daños, la pérdida de material, ML, producida por la prueba de barrido de neumático se asume como variable dependiente. Con el fin de hacer que el procedimiento de ensayo sea independiente del tipo de vehículo utilizado, la energía disipada en el rozamiento, Ed, se propone como variable independiente.

Suponiendo un área circular de la huella del neumático y una distribución triangular simétrica respecto al eje, de la tensión tangencial durante la prueba de barrido de los neumáticos, la energía disipada por fricción o rozamiento, Ed , puede ser evaluada a través de la siguiente relación:

$$Ed = 2\pi \cdot \mu \cdot p_g \cdot \varphi \cdot N \cdot \frac{R^3}{3}$$

Dónde μ es el coeficiente de fricción que se asume como 0,9 en contacto seco y condiciones cuasiestáticas, p_g es la presión de inflado de los neumáticos, φ ángulo de giro del neumático, N es el número de veces que se realiza el test (de acuerdo con la explicación anterior) y R representa el radio del área de huella del neumático que se puede conocer una vez sabida la presión del neumático y la carga vertical.

Finalmente el modelo regresivo puede ser descrito con la siguiente expresión:

$$ML = K \cdot \frac{Ed}{|E^*|}$$

Dónde ML representa la pérdida de material en gramos, E^* el Módulo dinámico de la mezcla bituminosa, K es la constante de regresión del ensayo (pendiente de la recta, figura 21) y representa la susceptibilidad al ravelling.

EL módulo dinámico se puede evaluar con la relación propuesta en “AASHTO Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures” dónde los parámetros de entrada son el tiempo de carga, la temperatura de la superficie. El porcentaje de betún, la fracción de huecos de la mezcla y la curva granulométrica.

En la siguiente figura se representa un resultado típico del tire sweep test.

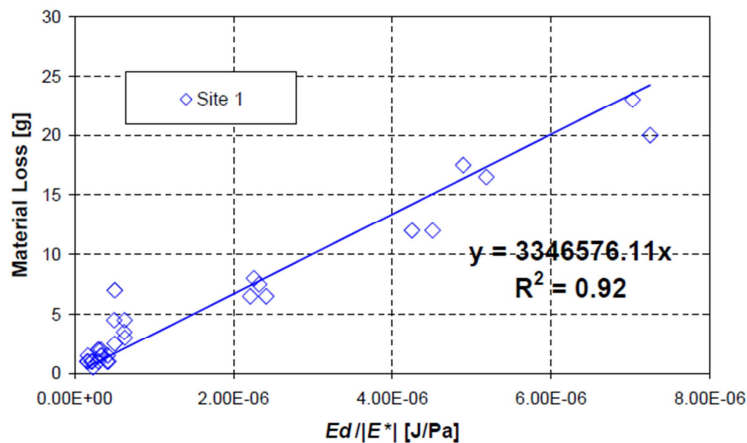


Figura 21. Gráfico de salida del Tire Sweep Test ($K = 3346576,11 \text{ g/(J/Pa)}$).
(Mauro D'Apuzzo, 2012)

Resultados del ensayo

Durante los años 2009-2010 un extenso estudio experimental se ha llevado a cabo en el sur, centro y norte de Italia en diferentes tipos de mezclas bituminosas con el objetivo de evaluar si la constante de susceptibilidad al ravelling es capaz de diferenciar las diferentes mezclas. Los primeros resultados mostraron que las zonas con áreas afectadas por el ravelling se caracterizaban por tener valores de K significativamente mayores que las zonas que no sufrían este daño. Además se comprobó que en general las mezclas bituminosas porosas poseían una susceptibilidad al ravelling más grande que las mezclas convencionales.

Por tanto, se concluyó que K es un parámetro que mide de forma eficiente los defectos de la mezcla bituminosa, relacionados con su contenido en huecos y betún.

Algunos de esos resultados fueron descritos en la siguiente tabla:

Road Section ID	DIRECTION (Northbound=N, Southbound = S)	LANE (SL = Standard Lane, FL = Fast Lane)	RAVELING SUSCEPTIBILITY, K [g/J/Pa]	YAX [millions axles /years]	IRV [years]	Number of years to reach the 25% of Raveled Area
1	N	SL	28992984.18	11.12	0.051	2.69
2	N	FL	28992984.18	3.31	0.171	9.04
3a	N	FL	43765657.57	3.31	0.079	5.95
3b	N	FL	35885867.24	3.31	0.115	7.28
39a	S	SL	46797261	11.12	0.021	1.66
4	N	SL	21789910.74	6.81	0.169	5.90
6a	N	SL	63084772.64	6.81	0.023	2.00
8	N	SL	39909683.56	6.81	2.451	5.58
10	N	SL	34854367.32	6.81	0.070	3.65
5	N	FL	10277456.18	1.15	3.840	75.57
7a	N	FL	9648388.207	1.15	3.936	80.35
7b	N	FL	10906524.16	1.15	3.756	71.35
11	N	FL	29338237.18	1.15	0.234	25.36
12	N	SL	29338237.18	6.81	2.452	6.71
13	N	FL	29338237.18	1.15	2.878	28.01
15	N	FL	29338237.18	0.94	2.992	33.69
14	N	SL	27156294	5.96	0.128	5.39
16	N	SL	29516736.74	5.96	2.448	7.29
17	N	FL	8954658.795	0.94	4.402	104.99
20	N	SL	28675995.35	5.96	2.450	7.43
21	N	FL	8954658.795	0.94	2.212	102.80
22	N	SL	29516736.74	5.96	2.428	7.27

Tabla 19. Resultados del Tire Sweep Test (Mauro D'Apuzzo, 2012).

Conclusiones relativas al ensayo

De acuerdo con la metodología descrita, el ensayo Tire Sweep Test simula el efecto del contacto entre neumáticos y pavimento mediante el giro de las ruedas de un coche testado in-situ. Además el ensayo, nos permite evaluar el daño que el ravelling produce independientemente del vehículo empleado mediante un modelo regresivo basado en los resultados del test.

El ensayo está destinado a provocar una disgregación de las partículas de la superficie de la carretera muy acelerada y es fácilmente aplicable. Sin embargo cabría destacar que el nivel de daño inducido en la capa de rodadura es mínimo si se compara con otros ensayos destinados a medir el ravelling.

Tras los diferentes estudios y resultados, se puede decir que la susceptibilidad al ravelling, K, parece ser un parámetro capaz de resumir, por un lado, los defectos de la mezcla y, por el otro, los defectos relacionados con la construcción de la carretera (mala compactación o segregación). Sin embargo, aunque las pruebas de barrido de los neumáticos son muy simples y relativamente baratas, hay varias cuestiones que merecen ser estudiadas:

- Realizar una comparación de los resultados con otras pruebas de laboratorio para la verificar el test. Ensayos como el Cántabro.
- Mejora en el procedimiento con el objetivo de hacer el test más fiable, como por ejemplo la repetitividad y reproducibilidad del ensayo.
- Desarrollar criterios de aceptación para identificar los umbrales adecuados en que los ensayos sean aceptables.

3.8 RAVELLING TEST

Antecedentes

Este método ha sido desarrollado por la American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM) con el fin de medir la resistencia al ravelling en mezclas bituminosas que emplean emulsiones y mezclas recicladas (RAP), todas ellas compactadas, mediante la rotación de un cabezal recubierto de una manguera de goma que abrasa la muestra de la mezcla bituminosa durante un período de tiempo determinado.

La precisión del ensayo aún no ha sido desarrollada ya que se trata de un test muy reciente. Por este motivo esta prueba de laboratorio no debería utilizarse como criterio de aceptación o rechazo de mezclas en su aplicación.

Este ensayo queda recogido en la normativa americana como D7196-12 «Standard Test Method for Ravelling Test of Cold Mixed Emulsified Asphalt Samples»

Descripción del ensayo

El ensayo consiste la fabricación de muestras según la normativa ASTM D979, que tras ser compactadas y curadas conforme a las especificaciones D6925 son pesadas, anotando los valores como “A”.

Una vez se anota el peso de las muestras, éstas son colocadas en la base de la máquina de abrasión, teniendo en cuenta que la probeta debe estar totalmente centrada con un mínimo de 10mm de altura de la muestra por encima de la base. La *figura 22* muestra un ejemplo de base adaptada para este ensayo.



Figura 22. Base adaptada del Ravelling Test (ASTM D7196, 2012).

El cabezal de abrasión debe tener una masa de 600 ± 15 g que incluye la manguera de goma de 127mm de longitud y 6,25mm de espesor. Una vez el cabezal es revisado, se pone en funcionamiento la máquina de abrasión durante unos 15 minutos aproximadamente. Podemos ver la máquina de abrasión en la *figura 23* donde se aprecia

el cabezal de abrasión con la manguera de goma y la muestra de mezcla bituminosa sobre la base adaptada.



Figura 23. Máquina de abrasión del Ravelling Test (ASMT D7196, 2012).

Tras este período de tiempo, se quita la masa de árido que ha sido disgregado de la mezcla con sumo cuidado y se pesa la probeta una vez ha sufrido el daño por abrasión, se anota este valor como B.

Finalmente para determinar el porcentaje total de pérdidas de cada muestra se utiliza la siguiente expresión:

$$\% \text{ Masa perdida} = 100 * (A - B)/A$$

Donde el resultado final será la media del ensayo de dos probetas de igual características.

Resultados del ensayo

Al ser un ensayo relativamente nuevo, aún no se disponen de muchos ensayos de laboratorio disponibles. En el estándar se especifica que la falta de resultados se debe a que ningún material ensayado hasta la fecha había obtenido resultados aceptables.

Aún así, algunos estudios han determinado las pérdidas que se producen en mezclas tipo RAP, con el uso de emulsión bituminosa, y otras que no contienen material reciclado. Los resultados se muestran en la siguiente figura, donde se compara la pérdida de material de una mezcla con emulsión y una reciclada respectivamente.

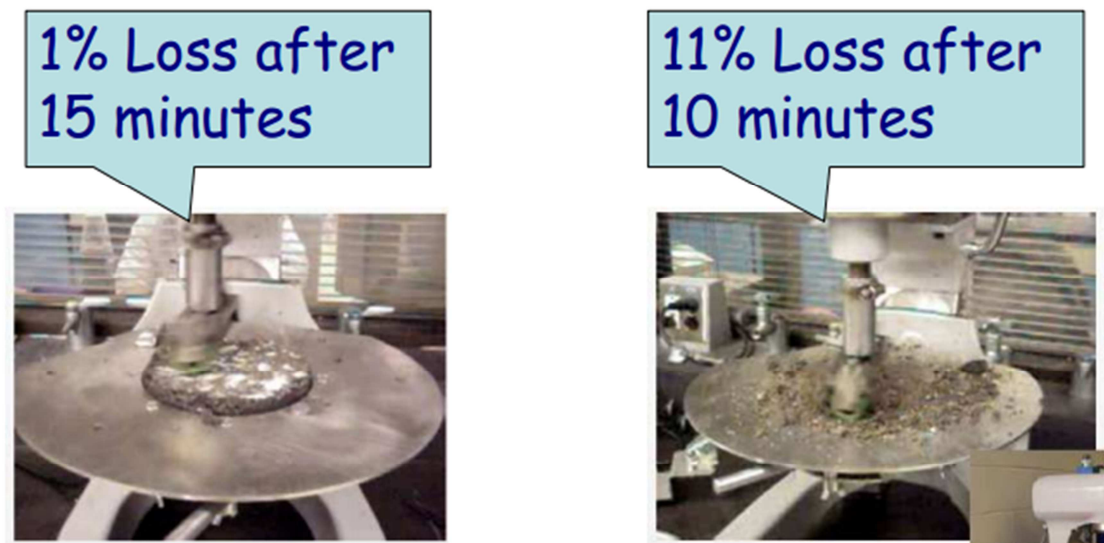


Figura 24. Pérdida por desgaste de una mezcla con emulsión sin material reciclado (izquierda) y una reciclada (derecha) en el ensayo de Ravelling Test (Mark Watson, 2012).

Se puede comprobar que el porcentaje de masa disgregada de la primera mezcla es mucho menor que la pérdida producida por el rodillo en la mezcla reciclada, siendo el tiempo de ensayo más pequeño que en la primera muestra.

Conclusiones relativas al ensayo

El ensayo de abrasión creado por la asociación ASTM se muestra como un ensayo que simula de forma aproximada el efecto del ravelling sobre las carreteras mediante el empleo de un rodillo recubierto de una manguera de goma que se puede asemejar al contacto que se produciría entre los neumáticos y la carretera.

Sin embargo se dispone de muy poca información para conocer tanto la sensibilidad del ensayo como su repetitividad o incluso el coste que puede suponer llevar a cabo este tipo de proceso.

3.9 ENSAYO DE ABRASIÓN POR NEUMÁTICOS CLAVETADOS

Antecedentes

El ensayo de abrasión por neumáticos claveteados describe dos métodos relacionados con la abrasión del terreno. El método A se basa en una mejora del conocido método Prall que junto al método B, el ensayo Finlandés PWR (SRK), forman el estándar europeo EN 12697-16 recogido en la normativa UNE [3].

La prueba Prall es uno de los varios métodos de laboratorio que determinan el desgaste de las superficies de las carreteras. Fue desarrollado inicialmente en los EE.UU. como un método para evaluar la adhesión de las mezclas. La diferencia se basa en que hoy en día se usan bolas de acero en lugar de bolas de goma que se utilizaban en el pasado.

El método llegó a Alemania a principio de 1970, pero nunca fue utilizado debido a que el uso de neumáticos con clavos estaba prohibido en aquella época.

En los años 1980 este ensayo llegó a Suecia, donde fue conocido como FAS 471. Los estudios que se realizaron entonces, demostraron que la pérdida por desgaste de las carreteras, en las carreteras suecas con alto uso de neumáticos con clavos en invierno, y de las probetas sometidas al ensayo Prall eran bastante similares, pero presentaban algunos problemas en cuanto a precisión [32].

Este test, junto a la norma finlandesa (SRK) PWR, forman hoy en día el estándar europeo conocido como “ensayo de abrasión por neumáticos claveteados” que determina la resistencia a la abrasión de mezclas calientes debidas al efecto de la circulación de vehículos dispuestos con neumáticos con clavos.

Descripción del ensayo

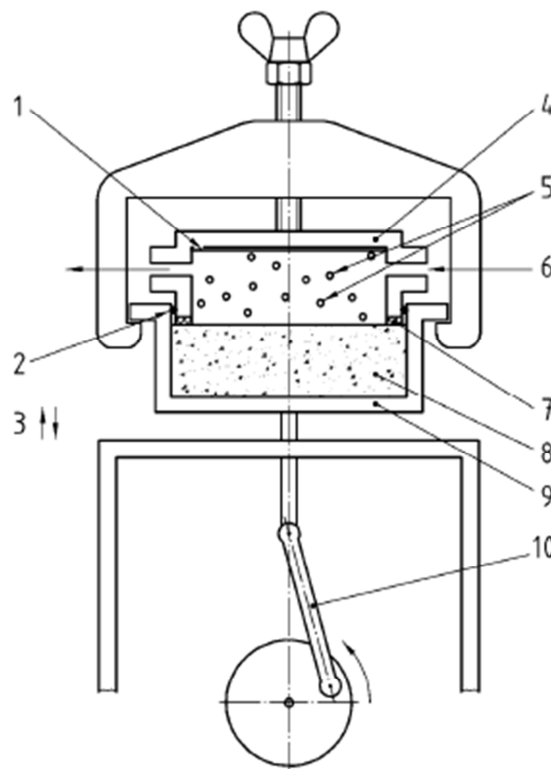
Método A

Una probeta cilíndrica de 100 ± 2 mm de diámetro y 30mm de longitud se lleva a una temperatura de 5°C. A continuación la probeta se somete durante un período de 15 minutos al desgaste producido por la acción abrasiva de 40 esferas de acero. Se registra la pérdida de volumen en milímetros, y este valor se considera el valor de la abrasión. Las probetas cilíndricas deben estar preparadas según las Normas Europeas EN 12697-30, EN 12697-31, EN 12697-32 o EN12697-27 si se trata de testigos extraído de la carretera. Al menos cuatro probetas son preparadas y acondicionadas en agua a 5 ± 1 °C durante al menos cinco horas, determinando su densidad aparente según la norma EN 12697-6. Una vez pasado este tiempo se sacan las probetas del agua, se seca su superficie y se anota la masa de la probeta saturada como M_1 . Después, se coloca en la

pared de la cámara de ensayo. Podemos ver la máquina de abrasión en las siguientes figuras.



Figura 25. Máquina Prall (Nina Raitanen, 2005).



Leyenda

- 1 Placa de caucho
- 2 Junta de caucho plana
- 3 Carrera
- 4 Tapa
- 5 Esferas de acero

- 6 Agua de refrigeración
- 7 Junta tórica
- 8 Probeta
- 9 Cámara de ensayo
- 10 Biela

Figura 26. Esquema detallado de la máquina de abrasión “método A” (EN 12697-16).

Una vez colocada, se coloca la junta de caucho plana sobre la probeta y las esferas de acero, se fija la tapa sobre la cámara y se ajusta un caudal de agua de refrigeración a $2 \pm 0,2$ litros por minuto. La máquina realizará el ensayo durante $15 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$ a una velocidad de 950 ± 10 revoluciones por minuto.

Cuando pasa este período de tiempo se saca la probeta del aparato y se sumerge en agua fría, se seca y se anota el valor de la probeta saturada como M_2 , con una precisión de 0,5 gramos.

Finalmente el valor de la abrasión en milímetros se calcula con la siguiente expresión:

$$Abr_A = \frac{(M_1 - M_2)}{\rho_{ap}}$$

Dónde:

ρ_{ap} = Densidad aparente de la probeta (g/ml)

M_1 = Masa de la probeta saturada antes de la abrasión (g).

M_2 = Masa de la probeta saturada después de la abrasión (g).

Método B

Una probeta cilíndrica fabricada según la misma normativa que en el método de ensayo A de 100 ± 1 mm de diámetro y al menos 45mm de longitud se lleva a una temperatura de 5°C . Más tarde se somete durante 2 horas al desgaste en húmedo que producen tres neumáticos con clavos y, se registra la pérdida de volumen en centímetros cúbicos como el valor de la abrasión.

En primer lugar, se fabrican al menos 3 probetas según las especificaciones anteriores. Si el tamaño máximo de árido de las muestras es superior a 16mm entonces se deberán ensayar al menos cuatro probetas. La probeta estará pegada por su parte superior e inferior a dos placas de acero que previamente serán pesadas en el aire, M_{p1} , y más tarde en agua, M_{p2} . Una vez anotados estos valores se pegan las placas a la probeta con cola epoxídica y se vuelve a pesar el conjunto de probeta más placas en aire, M_1 , y en agua, M_2 .

Para llevar las muestras a la temperatura de ensayo se mantendrán durante cinco horas en una cámara donde se acondicionarán. Más tarde se realiza un desgaste previo en las muestras, durante 15 minutos, para eliminar el mortero superficial en condiciones de seco.

Una vez cumplido el paso anterior, colocamos la probeta sobre la placa de base y una vez está fijada se pone en marcha la máquina de abrasión. Ésta, está compuesta de una unidad de rotación con tres neumáticos claveteados de caucho, de $90 \pm 3\text{ mm}$ de diámetro y $25 \pm 3\text{ mm}$ de anchura, dispuestos de 30 clavos cada neumático que ejercen una fuerza de 75 N en la muestra y que giran a una frecuencia de 1 ciclo cada 25 segundos.

Los tres neumáticos están posicionados de forma que uno está en la dirección de rotación, otro con una desviación de 5° respecto a la primera dirección y último tiene la misma desviación que el segundo en el sentido opuesto. Des esta forma el dispositivo de rotación estará en funcionamiento durante 2 horas a una velocidad de 520 revoluciones por minuto, es decir, un total de 62400 revoluciones. Podemos ver la posición de los neumáticos y algunos detalles del aparato de abrasión en la *figura 27*.

Una vez transcurrido este tiempo se retira la probeta con las placas de acero y se pesa en el aire, M_3 , y más tarde sumergida en agua, M_4 .

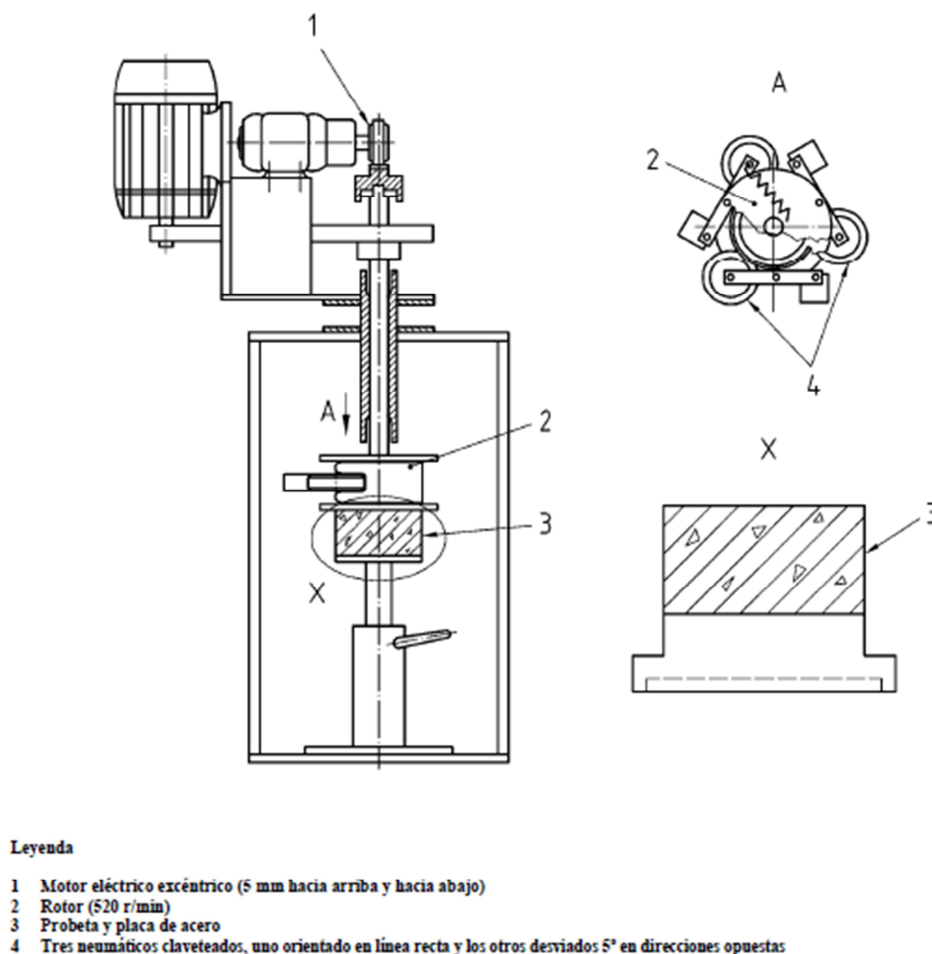


Figura 27. Esquema detallado de la máquina de abrasión “método B” (EN 12697-16).

Finalmente el valor de la abrasión calculado en mililitros tiene la siguiente forma:

$$Abr_B = (M_1 - M_2) - (M_3 + M_4)$$

Dónde:

M₁= La masa de la placa de acero y la probeta en el aire antes del ensayo.

M₂= La masa de la placa de acero y la probeta sumergida antes del ensayo.

M₃= La masa de la placa de acero y la probeta en el aire después del ensayo.

M₄= La masa de la placa de acero y la probeta sumergida después del ensayo.

Resultados del ensayo

Durante los años 2004-2010 se realizaron algunos ensayos con la metodología descrita como “A”. Estos ensayos fueron desarrollados mediante muestras extraídas en las carreteras Suecas y llevadas a laboratorio con el fin de medir la resistencia que los testigos presentaban ante la disgregación de material debido a la acción del tráfico, especialmente por aquellos vehículos dispuestos de neumáticos claveteados.

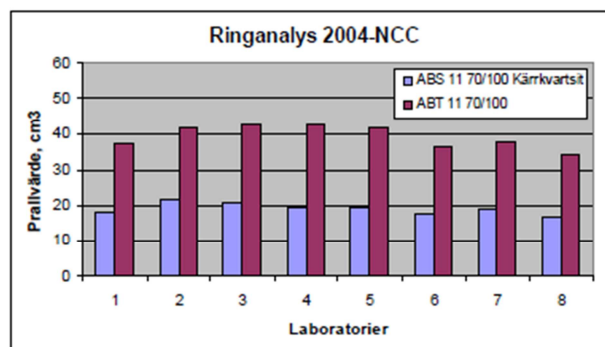


Figura 27. Pérdida de material en 8 muestras (Leif Viman, 2010).

A pesar de no disponer de la información necesaria para hacer una comparativa entre los resultados según las diferentes muestras dependiendo de su composición (contenido en betún, granulometría), podemos ver que las pérdidas representan alrededor de 40cm³ de la mezcla. Sabiendo que las probetas tienen un volumen de unos 236 cm³, esto representa un 17% de pérdidas de media en mezclas calientes.

En el año 2000, después del primer invierno de la construcción de dos secciones en la carretera finlandesa Ring Road III, un gran número de test tipo PWR fueron llevados a cabo por el Laboratory of Highway Engineering (HUT), debido al desgaste que se había producido en estas secciones de carretera diseñadas con mezclas SMA 5 y una mezcla especial llamada TINO. La implementación de estos pavimentos tenía el

objetivo de disminuir la sonoridad que los neumáticos con clavos, utilizados en invierno, producían en las carreteras finlandesas [37].

Los resultados de estos ensayos mostraron, pese a lo que se podría esperar en un principio, que el daño que los neumáticos claveteados producían sobre las mezclas anteriormente mencionadas era del orden de 2-3 veces superior al producido en mezclas tipo SMA 16 [35]. En 2000 y 2001 se repitieron estos ensayos en la carretera Ring Road I (Vallikallio) y Vantaa (Korso) donde resultó que la pérdida de las mezclas tipo SMA 5 se disgregaban seis veces más rápido que las mezclas SMA 11 y diez veces más rápido que las SMA 16 [36].

Hoy en día no se dispone de suficiente experiencia para poder evaluar los métodos utilizados para medir este efecto, descritos como “A” y “B”, por tanto no es posible decidir si se trata de un método suficientemente preciso o no. Sin embargo, se puede pensar que estos ensayos desarrollados a partir del ensayo Prall y del PWR guardan cierta correlación, con lo que a la hora de hacer una comparativa de entre los diferentes métodos que miden la resistencia a la abrasión utilizaremos los resultados obtenidos con los ensayos antiguos, es decir, supondremos que los resultados que se obtendrían de esta nueva metodología serán de un orden de magnitud similares.

Conclusiones relativas al ensayo

Los métodos descritos anteriormente como A y B, o métodos Prall y PWR, son ensayos destinados a evaluar la abrasión que se produce en las carreteras debido al uso de neumáticos dispuestos con clavos para el aumento de la seguridad en la circulación en vías afectadas por la nieve o el hielo. Sin embargo, a pesar de estar destinados a carreteras en las que el uso de neumáticos con clavos es frecuente, también pueden ser aplicados en la evaluación del ravelling en zonas en que este uso no es tan normal. Es decir, si se aplica alguno de estos métodos en carreteras que no están diseñadas con este objetivo, no haremos más que aumentar su resistencia a la disgregación y por tanto su vida útil.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende hacer una comparativa de todos los ensayos estudiados en el apartado 3 “*ensayos de abrasión*”, en el que se han descritos ocho métodos que evalúan el efecto del ravelling en diferentes países.

Mediante la información obtenida de diferentes experiencias con estos ensayos podremos evaluar de forma cualitativa las ventajas e inconvenientes que estos ensayos poseen, así como su aplicación y posible desarrollo.

4.2 ANÁLISIS

Una vez estudiados cada uno de los ensayos normalizados, o recientemente desarrollados, que describen el efecto de la disgregación de partículas en mezclas bituminosas debido a las acciones del tráfico y del clima, se pretende analizar cada una de las características de éstos, de forma comparativa, con el fin de proponer un ensayo que recoja los aspectos más positivos de cada uno de los métodos descritos. Para ello analizaremos las características de todos los ensayos en cuanto a: elemento de abrasión, intervención del fenómeno del agua en el ensayo, temperatura del ensayo, fuerza aplicada sobre la muestra, movimiento mediante el cual se produce abrasión y, duración del ensayo. Encontramos un resumen de estas características en la *tabla 20*.

Elemento abrasivo

Tras haber estudiado los diferentes ensayos de abrasión podemos fijarnos en que los elementos utilizados para abrasionar la mezcla se pueden agrupar en cuatro grandes familias:

- *Tambores rotativos*. Estos elementos producen disgregación del árido mediante el impacto que la muestra recibe al girar el tambor. En algunos ensayos esta práctica se lleva a cabo sin más elementos complementarios (Ensayo Cántabro), mientras que en otros como el ensayo Prall (método A del ensayo de abrasión por neumáticos claveteados) se introducen en el tambor una serie de bolas metálicas que incrementan el efecto abrasivo del ensayo. Los resultados obtenidos muestran que la sensibilidad de este ensayo frente a la disgregación del árido es muy elevada, sin embargo, se trata de métodos que no se aproximan demasiado al fenómeno que estamos estudiando, ya que esta pérdida de material se obtiene por impacto y no por abrasión.

- *Rodillos con mangueras de goma.* En este caso se recubren los rodillos giratorios mediante unos trozos de manguera de goma que simulan el efecto de los neumáticos. Son ejemplos el Ravelling Test y el ensayo de abrasión de lechadas bituminosas. En este caso tanto la presión ejercida sobre la mezcla como la velocidad a la que el rodillo gira depende de la mezcla a la que se quiera aplicar el ensayo. La fuerza que se debe aplicar para abrasionar una lechada es menor que la que necesaria para disgregar el mismo porcentaje de árido en una mezcla bituminosa y de la misma forma ocurre con la velocidad de rotación.
- *Rueda de neumático.* Sin lugar a duda este es el elemento que mejor aproxima una de las principales causas del ravelling, la acción del tráfico. El contacto entre neumático y mezcla está fielmente representado en estos ensayos que utilizan las ruedas de los vehículos como elemento abrasivo, como es el caso del Tire Sweep Test y del ensayo alemán ARTe. Sin embargo, la dificultad de estandarizar el modelo de neumático que se debe utilizar y el criterio de desgaste a partir del cual se debe cambiar el elemento abrasivo, convierte este elemento en un abrasivo muy realista pero poco efectivo si el objetivo es establecer un estándar a nivel nacional.
- *Pequeñas ruedas de neumático.* Los ensayos que emplean estos elementos son el RSAT y el método B del ensayo de abrasión por neumáticos claveteado (ensayo finlandés PWR). Se trata de un elemento que mediante su giro y la aplicación de una fuerza vertical bastante elevada producen pérdida de material en la muestra ensayada. Pero por otro lado al tener una superficie de contacto con la muestra relativamente baja se piensa que el método no es demasiado apropiado ya que la presión que se ejerce sobre un área de mezcla relativamente baja es muy elevada y por tanto el ensayo describe de forma poco aproximada el fenómeno de ravelling.

Por tanto el elemento que se considera más recomendable para el desarrollo o propuesta de un nuevo ensayo de abrasión sería un elemento abrasivo que pudiera ser estandarizado con facilidad y suficientemente agresivo para que produjera disgregación en la mezcla ensayada, descartando el uso de neumáticos por la complejidad de su normalización en cuanto a tamaño, modelo y desgaste del mismo.

Daño por el fenómeno agua

Como se ha podido comprobar en la experiencia del ensayo Cántabro de pérdida por desgaste por vía húmeda, el efecto que produce el agua sobre la disgregación de la mezcla es significativamente negativo, como cabía esperar con lo descrito en el capítulo 2.4. Por tanto un ensayo que contemple la posibilidad evaluar el ravelling por vía seca y húmeda proporciona información sobre cuánto agrava el agua la pérdida de adherencia en la mezcla. Sin embargo en la normativa actual ya existen muchos de ellos que miden esta característica, por lo tanto no es de primordial necesidad desarrollar un ensayo por

vía húmeda, aunque su aplicación nos proporciona información extra de significativo valor.

Temperatura del ensayo

La mayoría de los ensayos comparten el factor de que la temperatura a la que el ensayo se realiza es a temperatura ambiente. Este factor proporciona un punto realista en la cuantificación del ravelling, sin embargo si se desea ensayar muestras que presenten mayor resistencia quizás sea necesario aumentar la temperatura de las mezclas para poder reblandecer el ligante y así aumentar la sensibilidad que las mezclas presenten a la abrasión. Este hecho nos permitiría evaluar la resistencia de las mezclas a la disgregación en condiciones más extremas.

Fuerza aplicada sobre la muestra

La fuerza que los elementos abrasivos aplican a las probetas depende del tipo de ensayo que se esté aplicando. Es decir en algunos casos los ensayos están destinados a evaluar el ravelling en capas de rodadura que presentan mayor sensibilidad a la pérdida de material y por lo tanto, en éstas, con una fuerza vertical moderada es posible provocar disgregación en la muestra (lechadas bituminosas). Pero en el caso contrario, algunos ensayos destinados a medir el porcentaje de masa que se disgrega de la superficie de mezclas más resistentes es necesaria la aplicación de una fuerza significativamente superior para poder percibir un mínimo de material perdido.

Por lo tanto, si se quiere proponer un ensayo generalizado para cualquier tipo de mezclas, debería emplearse una carga vertical que mostrase un mínimo de porcentaje de masa disgregado en mezclas más resistentes, como las densas, pero que este valor no fuera excesivo en mezclas más sensibles, ya que podría acabar con la destrucción total de la muestra débil.

Duración del ensayo

Como se ha podido comprobar, la duración de los ensayos es bastante variable entre los diferentes ensayos, aunque la tendencia que presentan refleja que los ensayos que utilizan como elemento abrasivo el impacto por rotación de tambores tienen una duración de ensayo mucho más pequeña que el resto, pero no demasiado alejada de los ensayos que mediante rodillos disgregan las muestras. Sin embargo en los ensayos en los que se emplean neumáticos como elementos abrasivos la duración de éstos es muy elevada en comparación con el resto. Esto supone una desventaja en el aspecto económico, ya que se requiere de la presencia de un técnico de laboratorio que controle el ensayo y por tanto un encarecimiento de la prueba.

Movimiento abrasivo

Excepto en los casos en los que se utiliza el impacto como método abrasivo, el resto se basan en el empleo de motores eléctricos que proporcionan un movimiento

giratorio a los cabezales de abrasión, ruedas o rodillos. Sabemos que las zonas en las que el ravelling es más grave son aquellas en que la fricción entre los neumáticos y la superficie de la carretera es más agresiva, por ejemplo en curvas cerradas o maniobras bruscas. Por tanto el movimiento de giro de neumáticos, como se describe en el ensayo Tire Sweep Test aproxima de forma muy acertada este efecto. Además para que el desgaste en la mezcla sea uniforme y no solo se concentre en una zona, sería aconsejable que también se produjera un movimiento giratorio o longitudinal de la base donde la muestra está apoyada para de esta forma repartir el daño de forma equivalente en todos los puntos de la muestra.

Finalmente, con el objetivo de proponer un nuevo ensayo de abrasión sobre mezclas bituminosas en capas de rodadura que evalúen el ravelling, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- Elemento abrasivo fácilmente normalizable que sea suficientemente agresivo como para disgregar un valor significativo de partículas de árido de la mezcla.
- Tiempo de ensayo relativamente bajo con el fin de no aumentar los costes de éste.
- Fuerza vertical ejercida sobre la muestra en función del elemento abrasivo y la mezcla a ensayar.
- Movimiento abrasivo de giro sobre un eje horizontal, preferiblemente, junto a un movimiento de la muestra que homogenice los daños en todos los puntos de la probeta.

Ensayo	Elemento abrasivo	Acción del agua	Temperatura ensayo	Fuerza	Movimiento	Duración del ensayo	Normativa
Cántabro	Impacto de la muestra (disgregación)	No	Ambiente	-	Rotación de un tambor (sin bolas metálicas) 3,1 a 3,5 rad/s	300 revoluciones ~ (2,5 a 3)min	NLT-352/86
Cántabro (húmedo)	Impacto de la muestra (disgregación)	Si	Ambiente	-	Rotación de un tambor (sin bolas metálicas) 3,1 a 3,5 rad/s	<u>Mezclas calientes:</u> 300 revoluciones ~ (2,5 a 3)min <u>Mezclas en frío:</u> 200 revoluciones ~ (1,5 a 2)min	NLT-362/92
Abrasión de lechadas	Rodillo con manguera de goma	Si	Ambiente	22,3 N	Rotación del rodillo 144 rev/min	5 minutos	NLT-320/87 ISSA Method N.º 100 ASTM D 3910-84
RSAT	Rueda de neumático (pequeña escala)	No	20°C	67 kN	Rotación rueda (60 rev/min) + Rotación muestra(8 rev/min)	24 horas	-
ARTE	Dos ruedas de neumático	No	Ambiente	2kN	Rotación rueda(47 rev/min) + Longitudinal (9 rev/min)	60 minutos	-
Tire Sweep Test	Rueda de neumático	No	Ambiente	Variable	Giro de los neumáticos (sentido horizontal)	Variable en función de los ciclos que se aplican	-
Ravelling Test	Rodillo con manguera de goma	No	Ambiente	6kN	Rotación del rodillo	15 minutos	ASTM D7196-12
Abrasión por neumáticos claveteados	A: impacto de la muestra B: 3 neumáticos con clavos (pequeños)	No	Ambiente	A: - B: 75N	Rotación de un tambor (con bolas metálicas) Rotación neumáticos (520 rev/min)	A: 15 min B: 2 horas	UNE EN 12697-16

Tabla 20. Tabla comparativa de los diferentes ensayos de abrasión.

CAPÍTULO 5 PROPUESTA DE ENSAYO

5.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es el de proponer un ensayo que mida la abrasión provocada por la acción del tráfico sobre mezclas bituminosas, especialmente para el caso de mezclas discontinuas y templadas.

Por ello una vez finalizada la revisión bibliográfica, en la cual se ha estudiado de forma detallada diferentes ensayos relacionados con la pérdida de material, y analizado las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, se aplicará todo este conocimiento al desarrollo de un ensayo que evalúe el daño por abrasión mediante la adaptación de la máquina abrasiva del ensayo de abrasión por vía húmeda sobre lechadas bituminosas NLT-320/87.

En el caso del campo de aplicación español, para conseguir un ensayo relativamente barato que cumpla las características descritas anteriormente (capítulo 4), se pretende modificar la máquina de abrasión del test de abrasión de lechadas bituminosas por vía húmeda (WTAT), mediante la adaptación de este con una serie de cambios en su funcionamiento y características.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

La propuesta de ensayo consiste en la fabricación de una serie de probetas cilíndricas de mezcla bituminosa, que serán sometidas a la acción abrasiva de un cepillo metálico que gira sobre la muestra. El ensayo se aplicará durante 15 minutos a temperatura ambiente en la cámara de ensayo, con las mezclas calentadas a 60°C, dónde la resistencia a la abrasión vendrá definida por la pérdida de peso de la muestra antes y después del ensayo.

Uno de los cambios más significativos respecto al ensayo Wet Track Abrasion Test, se basa en que no se sumerge la probeta en agua para realizar la abrasión, para ello la máquina se ha adaptado introduciendo un soporte base de madera en el que irá apoyada la muestra mediante tres agujeros. En la *figura 28* se muestra una imagen de la placa y una muestra.

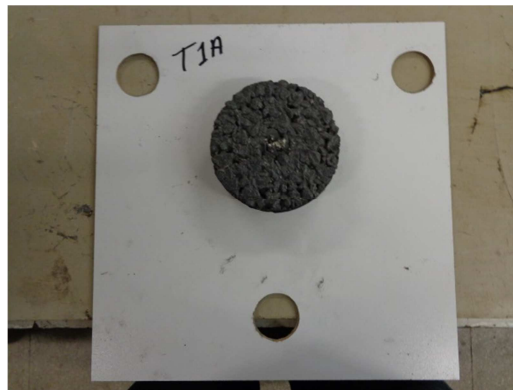


Figura 28. Placa base y muestra del ensayo propuesto (Juan Vilaplana).

Además el cabezal de rotación, que era un trozo de manguera de goma, ha sido remplazado por un cepillo de alambres trenzados de acero (*figura 29*) en forma de vaso debido a que la acción abrasiva de la goma en la mezcla bituminosa no sería significativa debido a la mayor dureza de esta muestra respecto a las lechadas. Por ello se ha optado por introducir un elemento más agresivo que pueda abrasionar las probetas de mezcla bituminosa.



Figura 29. Cepillo de alambres trenzados de acero (Juan Vilaplana).

La presión ejercida sobre las probetas también ha sido incrementada para producir la correcta abrasión, ha pasado de 22,3 N a 43,1 N (que corresponde a 4,4 kg), mediante la colocación de pesos sobre la parte superior de la máquina. Además para poder aumentar la sensibilidad del ensayo al efecto de abrasión, las mezclas tendrán una temperatura de 60°C a la hora de ser ensayadas, ya que de esta forma se reblandece el ligante y es más fácil que algunas partículas de la mezcla se disgreguen.

Finalmente la abrasión que se produce en cada probeta, en gramos, se obtiene mediante la diferencia entre la masa inicial de la probeta menos la masa de la misma una vez finalizado el ensayo.

Por tanto, el valor final de la disgregación de partículas producidas por abrasión se calculará como el valor medio de las probetas ensayadas.

5.3 RESULTADOS

En el Laboratorio de la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (UPC), se llevó a cabo este nuevo modelo de ensayo mediante la fabricación de probetas de mezclas templadas recicladas con emulsión como ligante, abrasionadas a partir del desarrollo de la maquina abrasiva del ensayo WTAT mediante un cepillo rotativo metálico.

Las mezclas eran tipo AC R70, 70% de contenido en material reciclado, empleando una emulsión en la que el betún que se encuentra en dispersión coloidal tiene una penetración de entre 50/70mm. Las mezclas fueron ensayadas a una temperatura de 60°C durante 15 minutos y, los resultados obtenidos se reflejan en la siguiente tabla.

AC R70 TEMP. EM 60°C **t = 15 min**

Probeta	M ₀ (g)	M _{15(min)} (g)	M ₀ – M ₁₅ (g)	Pérdida (%)
20B	808,2	800,1	8,1	1,47
21A	795,2	781,8	13,4	2,49
21B	784,4	775,6	8,8	1,62
22A	785,8	774,7	11,1	2,03
22B	778,0	769,4	8,6	1,60
25A	794,8	784,2	10,6	2,00
			Media	1,87

Tabla 21. Resultados ACR 70 temp. Em. 50/70.

Como podemos observar las pérdidas obtenidas en el ensayo son bastante pequeñas, hecho que resulta lógico ya que se trata de mezclas densas bien compactadas y fabricadas, por tanto es acertado que el valor de las pérdidas sea pequeño.

Sin embargo para evaluar si el ensayo discriminaba entre otro tipo de mezclas bajo las mismas condiciones de ensayo, otras muestras con un contenido más elevado en poros, menor contenido de ligante y mal compactadas fueron ensayadas y se obtuvo que la pérdida era de del 46%. Por lo tanto

5.4 CONCLUSIONES RELATIVAS AL ENSAYO

Se concluye que el método desarrollado es un buen descriptor del efecto de la abrasión ya que mediante un movimiento giratorio simula el daño que los neumáticos de la carretera producen en la superficie de la capa de rodadura.

El uso de un cabezal metálico junto a la temperatura en que las muestras son ensayadas promueve que la sensibilidad de las mezclas a la abrasión sea mayor y por tanto la sensibilidad del ensayo sea elevada. Otro aspecto positivo del uso del cepillo metálico es que es un aparato fácil de estandarizar, es decir, se trata de un cabezal tipificado que puede utilizado en los diferentes laboratorios sin que existan confusiones de materiales, dimensiones o desgaste de dicho aparato.

Además, debido al empleo de la misma máquina que se utiliza en el ensayo de abrasión de lechadas bituminosas por vía húmeda, se trata de un método que resultaría poco costoso y de relativa sencillez a la hora de ser aplicado.

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES

Uno de los deterioros más influyentes y que más pérdidas produce en las capas de rodadura de las carreteras es la abrasión o ravelling. La pérdida de material provocada por el paso de los neumáticos tiene consecuencias tanto en la disminución de las condiciones de confort y seguridad como en la pérdida económica que supone el mantenimiento y la rehabilitación de estos daños.

En este estudio se ha tratado con especial atención el caso de las mezclas discontinuas y templadas ya que, por un lado, los beneficios que comportan respecto a las mezclas convencionales son muy interesantes y por ello, este tipo de mezclas, están siendo desarrolladas e implementadas en las carreteras españolas. Pero por otro lado, debido a la composición que estas mezclas poseen, elevado contenido en poros y empleo de emulsión bituminosa como ligante, el efecto del ravelling se ve agravado de forma significativa.

Es por este motivo que se han estudiado y analizado diferentes ensayos de abrasión sobre capas de rodadura, por ser uno de los fallos más comunes que estas capas sufren en su puesta en servicio.

A pesar de que muchos de los ensayos estudiados evalúen la resistencia al ravelling, algunos no simulan de forma aproximada el fenómeno o gozan de poca experiencia para poder conocer su precisión. Actualmente la normativa española no recoge ningún ensayo que evalúe el daño que el ravelling produce en las mezclas bituminosas empleadas en capas de rodadura. Es por ello que tras analizar las ventajas e inconvenientes de todos los ensayos descritos y comparar sus características se ha propuesto un nuevo modelo de ensayo a partir de la adaptación de la máquina de abrasión del ensayo normalizado «Abrasión por vía húmeda de las lechadas bituminosas».

Las conclusiones del estudio realizado son las siguientes:

1. La adherencia entre las partículas de árido y el ligante es una de las propiedades principales que determinan la resistencia a la abrasión. Esta propiedad se ve afectada de forma significativa con el empleo de mezclas discontinuas templadas ya que la elevada porosidad y empleo de emulsión permiten que los efectos del envejecimiento, daño producido por el agua y falta de cohesión entre los componentes se vea incrementado de forma sustancial.
2. En los ensayos estudiados se pueden formar dos grandes grupos. Por un lado el ensayo Cántabro y el Prall son métodos que miden la disgregación de partículas debido al impacto de las probetas en un tambor que va rotando, pero no simulan el efecto del contacto entre neumáticos y pavimento que abrasiona las capas de

rodadura. Por otro lado, se ha observado que el resto de ensayos sí que reproduce este fenómeno mediante el empleo de rodillos dispuestos de mangueras de goma y ruedas neumáticas mediante la rotación de estos elementos.

3. Las condiciones en las que la mayoría de ensayos se llevan a cabo son parecidas. Todos ellos se ensayan a temperaturas ambientes, el fenómeno del agua solo es reproducido en pocos de ellos, la gran mayoría no considera este efecto. En cuanto a la fuerza vertical que se aplica en la muestra, podemos decir que es bastante variable y depende del elemento abrasivo que se utilice, las fuerzas oscilan entre 22N hasta 67 kN. Finalmente se ha observado que la duración de los diferentes ensayos varía de forma muy significativa, encontramos ensayos en los que con 3 minutos ya se muestra abrasión en la muestra mientras que en otros son necesarias hasta 24 horas para que se produzca el fenómeno de la abrasión.
4. La simplicidad del ensayo alemán ARTe junto a los buenos resultados que presenta frente a la discriminación entre mezclas con diferentes contenidos de ligante y huecos, lo convierte en un ensayo de abrasión muy efectivo y fácil de aplicar. Sin embargo presenta dificultades en la estandarización de su elemento abrasivo, debido a tratarse de una rueda de neumático.
5. En la adaptación del ensayo de abrasión de lechadas bituminosas se ha utilizado un cabezal giratorio compuesto de alambres de acero trenzados suficientemente agresivo para disgregar de forma apreciable la muestra describiendo de forma aproximada el fenómeno de ravelling. Los resultados obtenidos han sido positivos ya que se ha podido observar que el método discrimina entre mezclas resistentes y aquellas que por fabricación o composición deben comportarse de forma más sensible ante la disgregación de partículas.
6. El empleo de este tipo de cabezal permite por una parte estandarizar el ensayo, ya que se trata de un elemento tipificado fácil de reconocer cuando esta desgastado o en malas condiciones, y además permite utilizar una máquina ya existente con lo cual se reduce considerablemente el precio del ensayo ya que solo se trata de realizar unas pequeñas adaptaciones relativamente sencillas.
7. Las ventajas principales de la propuesta de ensayo se basan en su simplicidad, el aprovechamiento de la máquina de abrasión de lechadas bituminosas mediante pequeñas variaciones, bajos costes de ensayo y la facilidad de una posible estandarización del método.

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bañón Blázquez, L.; Bevià García, J.F.: Manual de carreteras Vol. 1. Alicante: Ortiz e Hijos, Contrastista de Obras, S.A., 2000.
- [2] Salil Mohan. Thesis: Winter Damage of Porous Asphalt.TUDELFT, 2010.
- [3] Kraemer, Pardillo, Rocci, Romana, Sánchez y Del Val.:Ingeniería de Carreteras. Volumen I. Mc Graw Hill. Madrid 2009.
- [4] Kraemer, Pardillo, Rocci, Romana, Sánchez y Del Val.. Ingeniería de Carreteras. Volumen II. Mc Graw Hill. Madrid 2009.
- [5] Shad Sargand, J. Ludwig Figueroa, William Edwards, and Abdalla S.: Report:Performance Assessment of Warm Mix Asphalt Pavements. Ohio Research Institute for Transportation and the Environment, 2009.
- [6] M. Kane , D. Zhao , E. Chailleux , F. Delarrard & M. T. Development of an accelerated pavement test reproducing the effect of natural ageing on skid resistance, Road Materials and Pavement Design, 2013.
- [7] Artículo 543 – Mezclas Bituminosas para Capas de Rodadura. Mezclas Drenantes y Discontinuas. O.C. 24/2008 de PG-3.
- [8] Molenaar JMM, Molenaar AAA. An investigation into the contribution of the bituminous binder to the resistance to ravelling of porous asphalt 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, 2000.
- [9] Voskuilen J, Tolman F and Rutten E, 2004. Do Modified Porous Asphalt Mixtures have a longer Service life? Eurobitume & Eurasphalt congress Vienna, 2004.
- [10] Hagos ET. The effect of aging on binder properties of porous asphalt concrete. PhD thesis, Delft University of Technology, the Netherlands, 2008.
- [11] Martínez-Echevarría Romero, M.J. Tesis Doctoral. Estudio del procedimiento de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa. Universidad de Granada, 2012.
- [12] Kringos N, Schmets A, pauli T, Scarpas T. A finite element base chemomechanical model to simulate healing in bitumen. Chemo-mechanics of Bituminous materials, 2009

- [13] Bianchetto, H.D.; Miró Recasens, J.R.; Pérez Jiménez, F.E. Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales. Primera parte: estudios en base al método UCL. Carreteras, 2006.
- [14] Costa Hernández A. Mezclas. Mezclas en caliente: capas finas y ultra finas. Asfaltos y Construcciones ELSAN S.A., 2010.
- [15] Bardesi A., Soto J.A. Mezclas bituminosas a baja temperatura: mezclas en frío, semicalientes y templadas. Respsol YPF, PROAS.
- [16] Fauzan Mohd, J. Thesis. Adhesion of asphalt mixtures. Univertisty of Nottingham, 2012.
- [17] Molenaar, A.A.A., Meekerk, A.J.J.: Perfomance of Porous Asphalt. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2006.
- [18] Lesueur, D.; Potti, J.J.: Cold mix design: A rational approach based on the current understanding of the breaking of bituminous emulsions. Road Materials and Pavement Design, 2004.
- [19] Lesueur, D.: Emulsion aggregates interactions through water analysis”, 2nd Euroasphalt and Eurobitume Congress. Barcelona, Book 2, 2000.
- [20] Pérez Jiménez, J.; Calzada, M. A.; Luceño, A.: Ensayo de pérdida por desgaste (ensayo, CántabroI para la caracterización, dosificación y control de mezclas bituminosas abiertas. Comisión técnica RILEM 56-MHN. Belgrado, 1983.
- [21] Pérez Jiménez, J.; Calzada, M. A.; Lázaro, L.: Ensayo Cántabro de pérdida por desgaste. Santander, 1984.
- [22] Miró Recasens. Tesis. Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo Cántabro. Barcelona, 1994.
- [23] NLT-352/86 «Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste».
- [24] NLT-149/91 «Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Angeles».
- [15] NLT-362/92 «Efecto del agua sobre la cohesión de mezclas bituminosas de granulometría abierta, mediante el ensayo cántabro de pérdida por desgaste».
- [16] Caltrans, 2002. Maintenance Technical Advisory Guide (MTAG), California Department of Transportation, California, April 2002.

- [17] FERNANDEZ DEL CAMPO, J. A., Pavimentos bituminosos en frío, 1979.
- [18] NLT-320/87 «Abrasión por vía húmeda de las lechadas bituminosas».
- [19] ISSA Test Method N.º 100, «Wet track abrasión of slurry seals», 1978.
- [20] ASTM D 3910-84 «Practice for Design, Testing, and Construction of Slurry Seal».
- [21] Botasso, H.G.; Cuattrocchio, A.C.; Rebollo, O.R.; Soengas C. J. Reciclado de pavimentos asfálticos en frío. Una forma de utilizar totalmente el RAP para el mantenimiento y rehabilitación de la red caminera, 2008, Buenos Aires (Argentina).
- [22] Shaopeng W., Sustainable construction materials, ASCE 2012.
- [23] Hofman, R, van Wieringen, J.B.M. and Visser, J.C.: Noise innovation Program IPG: Two Layer Porous Asphalt for use on the Dutch Main. Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 2005.
- [24] Quantao, Liu. Thesis. Induction Helaing of porous Asphalt Concrete. Wuhan University of Technology, P.R. China, 2012.
- [25] S. Mangnus, (Ingenieursbureau van Kleef B.V), G. Akker (Ingenieursbureau Van Kleef B.V.), G.G. van Bochove (Heijmans Infrastructuur B.V.), Rotating Surface Abrasion Test, een methode om de bestandheid tegen rafeling en wringende krachten te meten, Wegbouwkundige Werkdagen 2004.
- [26] Joëlle De Visscher, Laboratory tests for internal cohesion and ravelling of thin and ultra-thin wearing courses, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15th June 2012, Istanbul.
- [27] Schacht, A., Wang, D., Steinauer, B. Investigation of the granule loss of poroelastic road surfaces using the Aachener-Ravelling-Tester (ARTe). XXIVth World Road Congress, Mexico City, 26-30 September, 2011
- [28] Petr Hýzl, Zápis z 48. jednání CEN TC227/WG1/TG2 v Lisabonu, 21.- 22. Března (Praha) 2011. (Acta de la 48^a sesión del CEN TC227/WG1/TG2 en Lisboa Marzo 21 a 22, 2011)
- [29] Mauro D'Apuzzo,; Pietro Giannattasio.; Evaluation of Field raveling Susceptibility and Evolution of Bituminous Mixture. Italy, 2008.
- [30] ASTM D7196-12 «Standard Test Method for Ravelling Test of Cold Mixed Emulsified Asphalt Samples»

- [31] Mark Watson, Cold In-Place Recycling (CIR), North Dakota Asphalt Conference April 4, Bismarck, ND, 2012.
- [32] Leif Viman, Developement of the Prall method, Linköping (Suecia), 2010.
- [33] Kenneth Lind, Development of Prall test method in Nordic perspective (NordPrall), 2013.
- [34] EN 12697-16 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezcla bituminosa en caliente. Abrasión por neumáticos claveteados.
- [35] Valtonen, Jarkko; Kosonen, Tuomo; Peltonen, Petri: Melua vähentävien päällysteiden kuluminen. T94. HUT, Laboratory of Highway Engineering. Espoo, 2000.
- [36] Hyyppä, Ilmo: Valtonen, Jarkko: Melua vähentävien päällysteiden vaikutus ympäristömeluun; kulumisraportti. T112. HUT, Laboratory of Highway Engineering. Espoo, 2001.
- [37] Raitanen, N., Measuring of noise and wearing of quiet surfaces. Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology (Espoo, Finland) on the 9th of June, 2005
- [38] Nina Raitanen, Doctoral Dissertation. Measuring of Noise and Wearing Quiet Surfaces. Espoo, 2005.